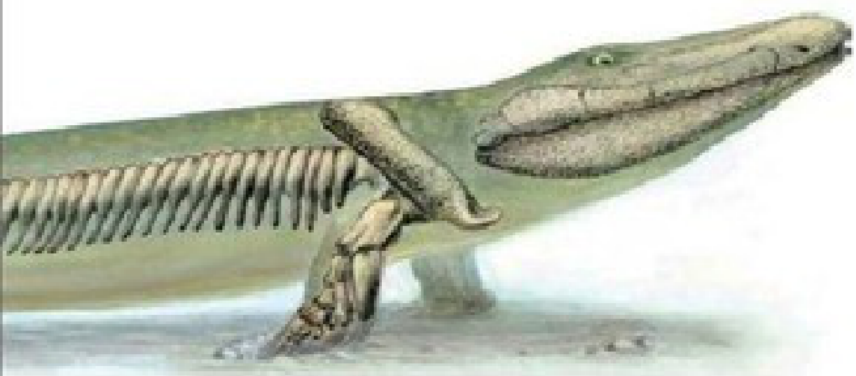
BESTSELLER NACIONAL

"Una apasionante historia de aventuras científicas que cambiará para siempre la forma en que entiendes lo que significa ser humano".

-OLIVER SACKS

TU PEZ INTERIOR

A UN VIAJE
A LOS
3.5 BILLONES DE LA HISTORIA
DEL
CUERPO HUMANO



NEIL SHUBIN

CON UN NUEVO EPILOGO

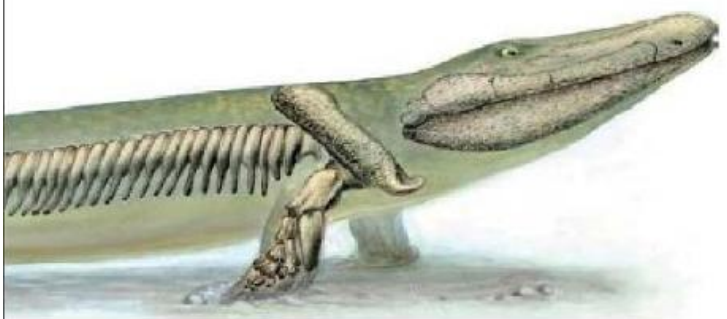
BESTSELLER NACIONAL

"Una apasionante historia de aventuras científicas que cambiará para siempre la forma en que entiendes lo que significa ser humano".

-OLIVER SACKS

TU PEZ INTERIOR

A UN VIAJE
A LOS
3.5 BILLONES DE LA HISTORIA
DEL
CUERPO HUMANO



NEIL SHUBIN

CON UN NUEVO EPILOGO

Índice

Página de título

Dedicación

Prefacio

UNO: Encontrar su pez interior

DOS: Conseguir un agarre

TRES: Handy Genes

CUATRO: Dientes por todas partes

Adelantándose

Seis: Los mejores planes (del cuerpo)

SIETE: Aventuras en el culturismo

OCHO: Hacer aromas

Nueve: Visión

DIEZ: Orejas

El significado de todo esto

Epílogo

Notas, referencias y lecturas adicionales

Agradecimientos

Derechos de autor

CONTENIDO

Página de título

Dedicación

Prefacio

UNO: Encontrar su pez interior

DOS: Cómo agarrar

TRES: Handy Genes

CUATRO: Dientes por todas partes

CINCO: Adelantarse

SEIS: Los mejores planes (del cuerpo)

SIETE: Aventuras en el culturismo

OCHO: Haciendo aromas

NUEVE: Visión

DIEZ: Orejas

ONCE: El significado de todo esto

Epílogo

Notas, referencias y lecturas adicionales

Agradecimientos

Derechos de autor

A MICHELE

PREFACIO

Este libro surgió de una circunstancia extraordinaria en mi vida. Debido a la salida de la facultad, terminé dirigiendo el curso de anatomía humana en la escuela de medicina de la Universidad de Chicago. La anatomía es el curso durante el cual los nerviosos estudiantes de medicina de primer año disecan cadáveres humanos mientras aprenden los nombres y la organización de la mayoría de los órganos, agujeros, nervios y vasos del cuerpo. Esta es su gran entrada al mundo de la medicina, una experiencia formativa en su camino para convertirse en médicos. A primera vista, no se podría haber

imaginado un peor candidato para el trabajo de formación de la próxima generación de médicos: Soy un paleontólogo que ha pasado la mayor parte de su carrera trabajando con peces.

Resulta que ser un paleontólogo es una gran ventaja para enseñar anatomía humana.

¿Por qué? Los mejores mapas de carreteras para los cuerpos humanos están en los cuerpos de otros animales. La forma más simple de enseñar a los estudiantes los nervios de la cabeza humana es mostrarles el estado de las cosas en los tiburones. El mapa de carreteras más fácil para sus miembros está en los peces. Los reptiles son una verdadera ayuda para la estructura del cerebro. La razón es que *los cuerpos de estas criaturas son a menudo versiones más simples de los nuestros.*

Durante el verano de mi segundo año dirigiendo el curso, trabajando en el Ártico, mis colegas y yo descubrimos peces fósiles que nos dieron nuevos y poderosos conocimientos sobre la invasión de la tierra por los peces hace más de 375 millones de años. Ese descubrimiento y mi incursión en la enseñanza de la anatomía humana me llevó a explorar una profunda conexión. Esa exploración se convirtió en este libro.

CAPÍTULO UNO

ENCONTRAR TU PEZ INTERIOR

Los veranos típicos de mi vida adulta los paso en la nieve y el aguanieve, agrietando las rocas en los acantilados bien al norte del Círculo Polar Ártico. La mayoría de las veces me congelo, me salen ampollas y no encuentro absolutamente nada. Pero si tengo suerte,

encuentro antiguas espinas de pescado. Eso puede no parecer un tesoro enterrado para la mayoría de la gente, pero para mí es más valioso que el oro.

Las antiguas espinas de pescado pueden ser un camino hacia el conocimiento de quiénes somos y cómo l egamos a serlo. Aprendemos acerca de nuestros propios cuerpos en lugares aparentemente extraños, que van desde los fósiles de gusanos y peces recuperados de las rocas de todo el mundo hasta el ADN de prácticamente todos los animales vivos en la Tierra hoy en día. Pero eso no explica mi confianza en que los restos óseos del pasado, y los restos de peces, no menos, ofrecen pistas sobre la estructura fundamental de nuestros cuerpos.

¿Cómo podemos visualizar eventos que ocurrieron hace millones y, en muchos casos, miles de millones de años? Desafortunadamente, no hubo testigos oculares; ninguno de nosotros estaba cerca. De hecho, nada que hable o tenga una boca o incluso una cabeza estuvo alrededor durante la mayor parte de este tiempo. Peor aún, los animales que existían entonces han estado muertos y enterrados durante tanto tiempo que sus cuerpos rara vez se conservan. Si consideramos que más del 99 por ciento de todas las especies que han vivido se han extinguido, que sólo una fracción muy pequeña se conserva como fósiles, y que una fracción aún más pequeña aún se encuentra, entonces cualquier intento de ver nuestro pasado parece condenado desde el principio.

CAVANDO FÓSILES, VIÉNDONOS A NOSOTROS MISMOS

Vi por primera vez uno de nuestros peces internos en una tarde nevada de julio mientras estudiaba rocas de 375 millones de años de antigüedad en la isla Ellesmere, a una latitud de unos 80 grados al norte. Mis colegas y yo habíamos viajado a esta desolada parte del mundo para tratar de descubrir una de las etapas clave en el cambio de los peces a los animales terrestres. En las rocas sobresalía el hocico de un pez. Y no cualquier pez: un pez con la cabeza plana. Una vez que vimos la cabeza plana supimos

que estábamos en algo. Si se encontrara más de este esqueleto dentro del acantilado, revelaría las primeras etapas de la historia de nuestro cráneo, nuestro cuello, incluso nuestras extremidades.

¿Qué me dijo una cabeza plana sobre el cambio del mar a la tierra? Más relevante para mi seguridad personal y comodidad, ¿por qué estaba en el Ártico y no en Hawai?

Las respuestas a estas preguntas se encuentran en la historia de cómo encontramos fósiles y cómo los usamos para descifrar nuestro propio pasado.

Los fósiles son una de las principales líneas de evidencia que usamos para entendernos a nosotros mismos. (Los genes y los embriones son otros, de los que hablaré más adelante.) La mayoría de la gente no sabe que encontrar fósiles es algo que a menudo podemos hacer con una precisión y previsibilidad sorprendentes.

Trabajamos en casa para maximizar nuestras posibilidades de éxito en el campo. Luego dejamos que la suerte tome el control.

La relación paradójica entre la planificación y el azar se describe mejor en el famoso comentario de Dwight D. Eisenhower sobre la guerra: "Al prepararme para la batalla, he descubierto que la planificación es esencial, pero los planes son inútiles". Esto captura la paleontología de campo en pocas palabras. Hacemos todo tipo de planes para llegar a prometedores yacimientos de fósiles. Una vez que estamos allí, todo el plan de campo puede ser lanzado por la ventana. Los hechos en el terreno pueden cambiar nuestros mejores planes.

Sin embargo, podemos diseñar expediciones para responder a preguntas científicas específicas. Usando algunas ideas simples, de las que hablaré más adelante, podemos predecir dónde se pueden encontrar fósiles importantes. Por supuesto, no tenemos éxito el 100 por ciento de las veces, pero nos hacemos ricos a menudo para hacer las cosas interesantes. He hecho una carrera de hacer justamente eso: encontrar los primeros mamíferos para responder a las preguntas de los orígenes de los mamíferos, las primeras ranas para responder a las preguntas de los orígenes de las ranas, y algunos de los primeros animales con extremidades para entender los orígenes de los animales que viven en la tierra.

En muchos sentidos, los paleontólogos de campo tienen más facilidad para encontrar nuevos sitios hoy en día que antes. Sabemos más sobre la geología de las zonas locales, gracias a la exploración geológica

realizada por los gobiernos locales y las empresas de petróleo y gas. Internet nos da un rápido acceso a mapas, información de estudios y fotos aéreas. Incluso puedo escanear su patio trasero en busca de sitios fósiles prometedores directamente desde mi portátil. Por si fuera poco, los dispositivos de imagen y radiografía pueden ver a través de algunos tipos de roca y nos permiten visualizar los huesos del interior.

A pesar de estos avances, la caza de los fósiles importantes es muy similar a la de hace cien años. Los paleontólogos todavía necesitan mirar la roca, literalmente para arrastrarse sobre ella, y los fósiles que hay dentro a menudo deben ser extraídos a

mano. Hay que tomar tantas decisiones al buscar y extraer huesos fósiles que estos procesos son difíciles de automatizar. Además, mirar en una pantalla de monitor para encontrar fósiles nunca sería tan divertido como excavar por ellos.

Lo que lo hace difícil es que los yacimientos fósiles son raros. Para maximizar nuestras posibilidades de éxito, buscamos la convergencia de tres cosas. Buscamos lugares que tengan rocas de la edad adecuada, rocas del tipo adecuado para preservar los fósiles, y rocas que estén expuestas en la superficie. Hay otro factor: la serendipia.

Eso lo mostraré con un ejemplo.

Nuestro ejemplo nos mostrará una de las grandes transiciones de la historia de la vida: la invasión de la tierra por los peces. Durante miles de millones de años, toda la vida vivió sólo en el agua. Luego, hace unos 365 millones de años, las criaturas también habitaron la tierra. La vida en estos dos entornos es radicalmente diferente. Respirar en el agua requiere órganos muy diferentes a los del aire. Lo mismo ocurre con la excreción, la alimentación y el movimiento. Tuvo que surgir un tipo de cuerpo totalmente nuevo. A primera vista, la división entre los dos ambientes parece casi insalvable. Pero todo cambia cuando miramos las pruebas; lo que parece imposible realmente ocurrió.

En la búsqueda de rocas de la edad adecuada, tenemos un hecho notable de nuestro lado. Los fósiles en las rocas del mundo no están dispuestos al azar. Dónde se asientan, y lo que hay dentro de ellos, está definitivamente ordenado, y podemos usar este orden para diseñar nuestras expediciones. Miles de millones de años de cambios han dejado capa sobre capa de diferentes tipos de roca en la tierra. La

suposición de trabajo, que es fácil de probar, es que las rocas de la parte superior son más jóvenes que las rocas de la parte inferior; esto suele ser cierto en las zonas que tienen una sencilla disposición de capas (pensemos en el Gran Cañón). Pero los movimientos de la corteza terrestre pueden causar fallas que cambian la posición de las capas, poniendo rocas más viejas sobre las más jóvenes. Afortunadamente, una vez que se reconocen las posiciones de estas fallas, a menudo podemos recomponer la secuencia original de capas.

Los fósiles dentro de estas capas de roca también siguen una progresión, con capas inferiores que contienen especies completamente diferentes a las de las capas de arriba.

Si pudiéramos extraer una sola columna de roca que contuviera toda la historia de la vida, encontraríamos una extraordinaria gama de fósiles. Las capas inferiores contendrían poca evidencia visible de vida. Las capas superiores contendrían impresiones de un conjunto diverso de cosas parecidas a las medusas. Las capas aún más altas tendrían criaturas con esqueletos, apéndices y varios órganos, como ojos. Por encima de ellos habría capas con los primeros animales que tienen espinas dorsales. Y

así sucesivamente. Las capas con las primeras personas se encontrarían aún más altas.

Por supuesto, no existe una sola columna que contenga toda la historia de la Tierra. Más bien, las rocas en cada lugar de la Tierra representan sólo una pequeña porción de tiempo. Para obtener la imagen completa, necesitamos unir las piezas comparando las

propias rocas y los fósiles dentro de ellas, como si estuviéramos trabajando en un rompecabezas gigante.

Que una columna de rocas tenga una progresión de especies fósiles probablemente no es una sorpresa. Menos obvio es que podemos hacer predicciones detalladas sobre cómo podrían ser las especies en cada capa comparándolas con las especies de animales que están vivos hoy en día; esta información nos ayuda a predecir los tipos de fósiles que encontraremos en las capas de rocas antiguas. De hecho, las secuencias de fósiles en las rocas del mundo pueden predecirse comparándonos con los animales de nuestro zoológico o acuario local.

¿Cómo puede un paseo por el zoológico ayudarnos a predecir dónde

debemos buscar en las rocas para encontrar fósiles importantes? Un zoológico ofrece una gran variedad de criaturas que son todas distintas en muchos sentidos. Pero no nos centremos en lo que las hace distintas; para lograr nuestra predicción, necesitamos centrarnos en lo que las diferentes criaturas comparten. Podemos usar los rasgos comunes a todas las especies para identificar grupos de criaturas con rasgos similares. Todos los seres vivos pueden ser organizados y ordenados como un conjunto de muñecos de anidación rusos, con grupos más pequeños de animales comprendidos en grupos más grandes de animales. Cuando hacemos esto, descubrimos algo muy fundamental sobre la naturaleza.

Cada especie en el zoológico y el acuario tiene una cabeza y dos ojos. Llama a estas especies "Todo". Un subconjunto de las criaturas con una cabeza y dos ojos tiene extremidades. Llama a la especie con extremidades "Todo con extremidades". Un subconjunto de estas criaturas con cabeza y extremidades tiene un gran cerebro, camina en dos pies y habla. Ese subconjunto somos nosotros, los humanos. Podríamos, por supuesto, usar esta forma de categorizar las cosas para hacer muchos más subconjuntos, pero incluso esta triple división tiene poder de predicción.

Los fósiles dentro de las rocas del mundo generalmente siguen este orden, y podemos utilizarlo para diseñar nuevas expediciones. Para usar el ejemplo anterior, el primer miembro del grupo "Todo", una criatura con una cabeza y dos ojos, se encuentra en el registro fósil mucho antes que el primer "Todo con extremidades". Más precisamente, el primer pez (un miembro portador de la tarjeta de "Todo") aparece antes que el primer anfibio (un "Todo con extremidades"). Obviamente, refinamos esto observando más tipos de animales y muchas más características que comparten los grupos de ellos, así como evaluando la edad real de las propias rocas.

En nuestros laboratorios, hacemos exactamente este tipo de análisis con miles y miles de características y especies. Miramos cada pedazo de anatomía que podemos, y a menudo en grandes trozos de ADN. Hay tantos datos que a menudo necesitamos computadoras poderosas para mostrarnos los grupos dentro de los grupos. Este enfoque es la base de la biología, porque nos permite hacer hipótesis sobre cómo las criaturas están relacionadas entre sí.

Además de ayudarnos a refinar las agrupaciones de la vida, cientos de años de colección de fósiles han producido una vasta biblioteca, o catálogo, de las edades de la tierra y la vida en ella. Ahora podemos identificar los períodos de tiempo generales en los que se produjeron los principales cambios. ¿Está interesado en el origen de los mamíferos? Ve a las rocas del período llamado Mesozoico Temprano; la geoquímica nos dice que estas rocas tienen probablemente unos 210 millones de años. ¿Interesado en el origen de los primates? Ve más arriba en la columna de rocas, al período Cretáceo, donde las rocas tienen unos 80 millones de años.

El orden de los fósiles en las rocas del mundo es una poderosa evidencia de nuestras conexiones con el resto de la vida. Si, excavando en rocas de 600 millones de años de antigüedad, encontráramos la medusa más antigua junto al esqueleto de una marmota, entonces tendríamos que reescribir nuestros textos. Esa marmota habría aparecido antes en el registro fósil que el primer mamífero, reptil o incluso pez, incluso antes que el primer gusano. Además, nuestra antigua marmota nos diría que mucho de lo que creemos saber sobre la historia de la Tierra y la vida en ella es erróneo. A pesar de los más de 150 años de búsqueda de fósiles en todos los continentes de la Tierra y en prácticamente todas las capas de roca accesibles, esta observación nunca se ha realizado.

Lo que descubrimos en nuestro paseo por el zoológico refleja cómo los fósiles están dispuestos en las rocas del mundo.

Volvamos ahora a nuestro problema de cómo encontrar parientes de los primeros peces que caminaron por tierra. En nuestro esquema de agrupación, estas criaturas están en algún lugar entre las "Cosas" y las "Cosas con extremidades". Mapea esto a lo que sabemos de las rocas, y hay fuertes evidencias geológicas de que el período de hace 380 millones a 365 millones de años es el momento crítico. Las rocas más jóvenes de ese rango, las que tienen unos 360 millones de años, incluyen diversos tipos de animales fosilizados que todos reconoceríamos como anfibios o reptiles. Mi colega Jenny Clack

de la Universidad de Cambridge y otros han descubierto anfibios en rocas de Groenlandia que tienen unos 365 millones de años. Con sus cuellos, sus orejas y sus cuatro patas, no parecen peces. Pero en las rocas que tienen alrededor de 385 millones de años, encontramos peces enteros que se parecen, bueno, a los peces. Tienen aletas, cabezas cónicas y escamas, y no tienen cuello. Dado esto, probablemente no sea una gran sorpresa que nos enfoquemos en rocas de alrededor de 375 millones de años de antigüedad para encontrar evidencia de la transición entre peces y animales terrestres.

Hemos establecido un período de tiempo para investigar, y así hemos identificado las capas de la columna geológica que deseamos investigar. Ahora el desafío es encontrar rocas que se formaron en condiciones capaces de preservar fósiles. Las rocas se forman en diferentes tipos de entornos y estos entornos iniciales dejan distintas firmas en las capas de la roca. Las rocas volcánicas están en su

mayoría fuera. Ningún pez que conozcamos puede vivir en la lava. E incluso si tal pez existiera, sus huesos fosilizados no sobrevivirían a las condiciones sobrecalentadas en las que se forman los basaltos, riolitos, granitos y otras rocas ígneas. También podemos ignorar las rocas metamórficas, como el esquisto y el mármol, ya que han sufrido sobrecalentamiento o presión extrema desde su formación inicial. Cualquier fósil que se haya preservado en ellas hace tiempo que ha desaparecido. Lo ideal para preservar los fósiles son las rocas sedimentarias: calizas, areniscas, limolitas y esquistos. Comparadas con las rocas volcánicas y metamórficas, éstas se forman por procesos más suaves, incluyendo la acción de ríos, lagos y mares. No sólo es probable que los animales vivan en tales ambientes, sino que los procesos sedimentarios hacen que estas rocas sean lugares más probables para preservar los fósiles. Por ejemplo, en un océano o un lago, las partículas se asientan constantemente fuera del agua y se depositan en el fondo. Con el tiempo, a medida que estas partículas se acumulan, son comprimidas por nuevas capas superiores. La compresión gradual, junto con los procesos químicos que ocurren dentro de las rocas durante largos períodos de tiempo, significa que cualquier esqueleto contenido en las rocas tiene una posibilidad decente de fosilizarse. Procesos similares suceden en y a lo largo de los arroyos. La regla general es que cuanto más suave sea el flujo de la corriente o del río, mejor preservados estarán los fósiles.

Cada roca que se sienta en el suelo tiene una historia que contar: la historia de cómo se veía el mundo cuando se formó esa roca en particular. Dentro de la roca hay evidencia de climas y entornos pasados, a menudo muy diferentes a los de hoy. A veces, la desconexión entre el presente y el pasado no podría ser más aguda. Tomemos el ejemplo extremo del Monte Everest, cerca de cuya cima, a una altitud de más de cinco millas, se encuentran rocas de un antiguo fondo marino. Ve a la Cara Norte casi a la vista del famoso Paso Hillary, y podrás encontrar conchas marinas fosilizadas. De manera similar, donde trabajamos en el Ártico, las temperaturas pueden alcanzar los 40 grados Fahrenheit bajo cero en invierno. Sin embargo, en el interior de algunas de las rocas de la región hay restos de un antiguo delta tropical, casi como el Amazonas: plantas y peces fosilizados que sólo podrían haber prosperado en lugares cálidos y húmedos. La presencia de especies adaptadas al calor en lo que hoy son altitudes y latitudes extremas atestigua lo mucho que nuestro planeta puede cambiar: las montañas suben

y bajan, los climas son cálidos y frescos, y los continentes se mueven. Una vez que nos demos cuenta de la inmensidad del tiempo y de las

extraordinarias formas en que nuestro planeta ha cambiado, estaremos en condiciones de utilizar esta información para diseñar nuevas expediciones de caza de fósiles.

Si estamos interesados en comprender el origen de los animales con extremidades, podemos ahora restringir nuestra búsqueda a las rocas que tienen una antigüedad aproximada de 375 a 380 millones de años y que se formaron en océanos, lagos o arroyos. Descartemos las rocas volcánicas y las rocas metamórficas, y nuestra imagen de búsqueda de sitios prometedores se enfocará mejor.

Sin embargo, estamos sólo parcialmente en camino de diseñar una nueva expedición.

No nos sirve de nada que nuestras prometedoras rocas sedimentarias de la edad adecuada estén enterradas en lo profundo de la tierra, o que estén cubiertas de hierba, o centros comerciales, o ciudades. Estaríamos cavando a ciegas. Como pueden imaginar, perforar un pozo para encontrar un fósil ofrece una baja probabilidad de éxito, más bien como lanzar dardos a una diana escondida detrás de la puerta de un armario.

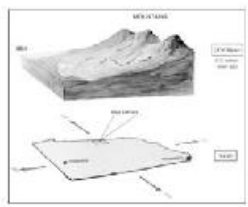
Los mejores lugares para buscar son aquellos donde podemos caminar kilómetros sobre la roca para descubrir áreas donde los huesos están "desgastados". Los huesos fósiles suelen ser más duros que la roca circundante, por lo que se erosionan a un ritmo ligeramente más lento y presentan un perfil elevado en la superficie de la roca. En consecuencia, nos gusta caminar sobre el lecho rocoso desnudo, encontrar una pequeña cantidad de huesos en la superficie, y luego cavar.

Así que aquí está el truco para diseñar una nueva expedición de fósiles: encontrar rocas de la edad adecuada, del tipo adecuado (sedimentarias), y bien expuestas, y estamos en el negocio. Los sitios ideales para la caza de fósiles tienen poca cobertura de suelo y poca vegetación, y han estado sujetos a pocas perturbaciones humanas. ¿Es una sorpresa que una fracción significativa de los descubrimientos ocurra en zonas desérticas? En el desierto de Gobi. En el Sahara. En Utah. En los desiertos árticos, como Groenlandia.

Todo esto suena muy lógico, pero no olvidemos la serendipia. De

hecho, fue la serendipia la que puso a nuestro equipo en el camino de nuestro pez interior. Nuestros primeros descubrimientos importantes no ocurrieron en un desierto, sino a lo largo de una carretera en el centro de Pensilvania donde las exposiciones difícilmente podrían haber sido peores. Para colmo, buscábamos allí sólo porque no teníamos mucho dinero.

Se necesita mucho dinero y tiempo para ir a Groenlandia o al desierto del Sahara. Por el contrario, un proyecto local no requiere grandes subvenciones de investigación, sólo dinero para gas y peajes de autopista. Estas son variables críticas para un joven estudiante graduado o un profesor universitario recién contratado. Cuando empecé mi primer trabajo en Filadelfia, el señuelo era un grupo de rocas conocidas colectivamente como la Formación Catskill de Pennsylvania. Esta formación ha sido ampliamente estudiada durante más de 150 años. Su edad era bien conocida y abarcaba el Devónico



tardío. Además, sus rocas eran perfectas para preservar los primeros animales de extremidades y sus parientes más cercanos. Para entender esto, es mejor tener una imagen de cómo se veía Pensilvania en el Devónico. Elimine la imagen de la actual Filadelfia, Pittsburgh o Harrisburg de su mente y piense en el delta del río Amazonas.

Había tierras altas en la parte este del estado. Una serie de arroyos que corrían de este a oeste drenaban estas montañas, terminando en un gran mar donde hoy está Pittsburgh.

Es difícil imaginar mejores condiciones para encontrar fósiles, excepto que el centro de Pensilvania está cubierto de ciudades, bosques y campos. En cuanto a las exposiciones, son en su mayoría donde el Departamento de Transporte de Pensilvania (PennDOT) ha decidido poner grandes carreteras. Cuando el PennDOT construye una autopista, explota. Cuando explota, expone la roca. No siempre es la mejor exposición, pero tomamos lo que podemos conseguir. Con ciencia barata, se obtiene lo que se paga.

Y también hay una serendipia de otro orden: en 1993, Ted Daeschler l egó a estudiar paleontología bajo mi supervisión. Esta asociación iba a cambiar nuestras vidas.

Nuestros diferentes temperamentos están perfectamente adaptados: Tengo hormigas en mis pantalones y siempre estoy pensando en el próximo lugar donde buscar; Ted es paciente y sabe cuando sentarse en un sitio para minarlo por sus riquezas. Ted y yo comenzamos un estudio de las rocas devonianas de Pennsylvania con la esperanza de encontrar nuevas pruebas sobre el origen de las extremidades. Empezamos conduciendo a prácticamente todos los grandes cortes de carretera en la parte este del estado. Para nuestra gran sorpresa, poco después de comenzar la encuesta, Ted encontró un maravilloso hueso del hombro. Nombramos a su dueño *Hynerpeton,* un nombre que se traduce del griego como "pequeño animal rastrero de Hyner". Hyner, Pennsylvania, es la ciudad más cercana. *Hynerpeton* tenía un hombro muy robusto, lo que indica una criatura que probablemente tenía apéndices muy poderosos.

Desafortunadamente, nunca pudimos encontrar el esqueleto completo del animal. Las exposiciones fueron demasiado limitadas. Por... Lo adivinó: vegetación, casas y centros comerciales.

A lo largo de las carreteras de Pennsylvania, estábamos mirando un antiguo delta de río, muy parecido al Amazonas actual. El estado de Pensilvania (abajo) con la topografía devoniana trazada sobre él.

Después del descubrimiento del *Hynerpeton* y otros fósiles de estas rocas, Ted y yo estábamos buscando una roca mejor expuesta. Si toda nuestra empresa científica iba a basarse en la recuperación de trozos, entonces sólo podíamos abordar cuestiones muy limitadas. Así que tomamos un enfoque de "libro de texto", buscando rocas bien expuestas de la edad y tipo adecuados en regiones desérticas, lo que significa que no habríamos hecho el mayor descubrimiento de

nuestras carreras si no fuera por un libro de texto de introducción a la geología.

Originalmente estábamos mirando a Alaska y al Yukón como lugares potenciales para una nueva expedición, en gran parte debido a los descubrimientos relevantes hechos por otros equipos. Terminamos discutiendo y debatiendo sobre algo de geología esotérica, y en el calor del momento, uno de nosotros sacó el afortunado libro de texto de geología de un escritorio. Mientras hojeaba las páginas para averiguar quién de nosotros tenía razón, encontramos un diagrama. El diagrama nos dejó sin aliento; mostraba todo lo que estábamos buscando.

La discusión se detuvo, y comenzó la planificación de una nueva expedición de campo.

Basándonos en descubrimientos previos hechos en rocas ligeramente más jóvenes, creímos que los antiguos arroyos de agua dulce eran el mejor ambiente para comenzar nuestra caza. Este diagrama mostraba tres zonas con rocas devonianas de agua dulce, cada una con un sistema de delta de río. Primero, está la costa este de Groenlandia. Este es el hogar del fósil de Jenny Clack, una criatura muy temprana con extremidades y uno de los primeros tetrápodos conocidos. Luego está el este de Norteamérica, donde ya habíamos trabajado, hogar del *Hynerpeton.* Y hay una tercera área, grande y que corre de este a oeste a través del Ártico canadiense. No hay árboles, tierra o ciudades en el Ártico. Las posibilidades de que las rocas de la edad y tipo adecuados estuvieran extremadamente bien expuestas eran buenas.

Las exposiciones del Ártico canadiense eran bien conocidas, en particular por los geólogos y paleobotánicos canadienses que ya las habían cartografiado. De hecho, Ashton Embry, el líder de los equipos que hicieron gran parte de este trabajo, había descrito la geología de las rocas canadienses del Devónico como idéntica en muchos aspectos a la geología de Pennsylvania. Ted y yo estábamos listos para hacer las maletas en el momento en que leímos esta frase. Las lecciones que habíamos aprendido en las carreteras de Pennsylvania podrían ayudarnos en el Alto Ártico de Canadá.

Sorprendentemente, las rocas del Ártico son incluso más antiguas que los lechos fósiles de Groenlandia y Pensilvania. Así que la zona encaja

perfectamente con los tres criterios: edad, tipo y exposición. Aún mejor, era desconocida para los paleontólogos de vertebrados, y por lo tanto no estaba prevista para los fósiles.

El mapa que lo inició todo. Este mapa de América del Norte captura lo que buscamos en pocas palabras. Los diferentes tipos de sombreado reflejan dónde están expuestas las rocas de la edad devoniana, ya sean marinas o de agua dulce.

Tres áreas que una vez fueron deltas de ríos están etiquetadas. Modificado de la figura 13.1, R. H. Dott y R. L. Batten, *Evolution of the Earth* (Nueva York: McGraw-Hill, 1988). Reproducido con el permiso de The McGraw-Hill Companies.

Nuestros nuevos desafíos fueron totalmente diferentes a los que enfrentamos en Pensilvania. A lo largo de las carreteras de Pennsylvania, nos arriesgamos a ser golpeados por los camiones que pasaban zumbando mientras buscábamos fósiles. En el Ártico nos arriesgamos a ser comidos por osos polares, a quedarnos sin comida o a quedar abandonados por el mal tiempo. Ya no podíamos empacar sándwiches en el auto y conducir hasta los lechos de fósiles. Ahora teníamos que pasar por lo menos ocho días planeando cada día que pasábamos en el campo, porque las rocas eran accesibles sólo por aire y la base de suministros más cercana estaba a 250 mil as de distancia. Sólo podíamos volar con suficiente comida y suministros para nuestra tripulación, además de un estrecho margen de seguridad. Y, lo más importante, los estrictos límites de peso del avión significaban que podíamos sacar sólo una pequeña fracción de los fósiles que encontrábamos. Si a estas limitaciones se añade el corto período de tiempo durante el cual podemos trabajar en el Ártico cada año, se puede ver que las frustraciones a las que nos enfrentamos son completamente nuevas y desalentadoras.

Entre mi consejero graduado, el Dr. Farish A. Jenkins, Jr., de Harvard. Farish había dirigido expediciones a Groenlandia durante años y tenía la experiencia necesaria para llevar a cabo esta empresa. El equipo estaba listo. Tres generaciones académicas: Ted, mi antiguo alumno; Farish, mi asesor de posgrado; y yo íbamos a marchar hasta el Ártico para tratar de descubrir pruebas del paso de los peces a los animales terrestres.

No hay un manual de campo para la paleontología del Ártico. Recibimos recomendaciones de equipo de amigos y colegas, y leímos libros sólo para darnos

cuenta de que nada podría prepararnos para la experiencia en sí. En ningún momento se siente esto más agudamente que cuando el helicóptero deja uno por primera vez en alguna parte olvidada del Ártico totalmente solo. El primer pensamiento es de los osos polares. No puedo decirte cuántas veces he escudriñado el paisaje en busca de manchas blancas que se mueven. Esta ansiedad puede hacer que veas

cosas. En nuestra primera semana en el Ártico, uno de los tripulantes vio una mancha blanca en movimiento.

Parecía un oso polar a un cuarto de milla de distancia. Luchamos como Keystone Kops por nuestras armas, bengalas y silbatos hasta que descubrimos que nuestro oso era una liebre blanca del Ártico a doscientos pies de distancia. Sin árboles ni casas para juzgar la distancia, se pierde la perspectiva en el Ártico.

El Ártico es un lugar grande y vacío. Las rocas que nos interesaban están expuestas en un área de unos 1.500 kilómetros de ancho. Las criaturas que buscábamos medían alrededor de un metro de largo. De alguna manera, necesitábamos encontrarnos en un pequeño trozo de roca que había preservado nuestros fósiles. Los revisores de las propuestas de subvención pueden ser un grupo feroz; iluminan este tipo de dificultades todo el tiempo. Un revisor de una de las primeras propuestas de subvención de Farish para el Ártico lo expresó mejor. Como este árbitro escribió en su revisión de la propuesta (no cordialmente, debo añadir), las probabilidades de encontrar nuevos fósiles en el Ártico eran "peores que encontrar la proverbial aguja en el pajar".

Nos llevó cuatro expediciones a la Isla Ellesmere en seis años encontrar nuestra aguja. Demasiado para el serendipismo.

Encontramos lo que buscábamos intentando, fallando y aprendiendo de nuestros fracasos. Nuestros primeros sitios, en la temporada de campo de 1999, estaban en la parte occidental del Ártico, en la isla de Melville. No lo sabíamos, pero nos habían dejado en el borde de un antiguo océano. Las rocas estaban cargadas de fósiles, y encontramos muchos tipos diferentes de peces. El problema era que todos ellos parecían ser criaturas de aguas profundas, no del tipo que esperaríamos encontrar en los arroyos o lagos poco profundos que dieron lugar a los animales terrestres. Utilizando el análisis geológico de Ashton Embry, en el año 2000 decidimos trasladar la expedición al este, a la Isla El esmere, porque allí las rocas contendrían antiguos arroyos. No nos llevó mucho tiempo empezar a encontrar trozos de espinas de pescado del tamaño de una moneda conservados como fósiles.

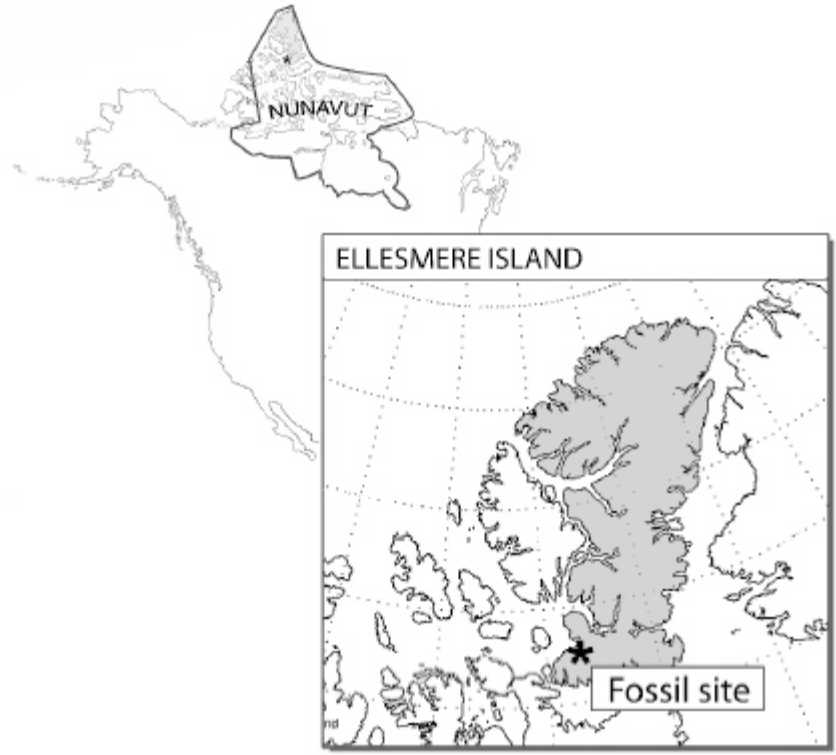
Nuestro campamento (arriba) parece diminuto en la inmensidad del paisaje. Mi casa de verano (abajo) es una pequeña tienda de campaña, normalmente rodeada de montones de rocas para protegerla de los vientos de 50 millas por hora.

Fotografías del autor.

El verdadero avance se produjo hacia el final de la temporada de campo en el año 2000. Fue justo antes de la cena, una semana antes de nuestra recogida programada para volver a casa. La tripulación había vuelto al campamento, y estábamos involucrados en nuestras actividades de la madrugada: organizando las recolecciones del día,

preparando notas de campo, y comenzando a armar la cena. Jason Downs, entonces un universitario ansioso por aprender paleontología, no había regresado al campamento a tiempo. Esto es un motivo de preocupación, ya que normalmente salimos en equipo; o si nos separamos, nos damos un horario definido de cuándo volveremos a contactar. Con los osos polares en la zona y las feroces tormentas que pueden llegar inesperadamente, no nos arriesgamos. Recuerdo estar sentado en la carpa principal con la tripulación, la preocupación de Jason construyendo con cada momento que pasa. Cuando empezamos a preparar un plan de búsqueda, oí abrirse la cremallera de la carpa. Al principio todo lo que vi fue la cabeza de Jason. Tenía una expresión de ojos salvajes en su cara y estaba sin aliento. Cuando Jason entró en la tienda, sabíamos que no se trataba de una emergencia de oso polar; su escopeta aún estaba en el hombro. La causa de su retraso se hizo evidente cuando su mano aún temblorosa sacó puñado tras puñado de huesos fósiles que se habían metido en todos los bolsillos: su abrigo, pantalones, camisa interior y mochila. Imagino que habría rellenado sus calcetines y zapatos si hubiera podido caminar a casa de esa manera.

Todos estos pequeños huesos fósiles estaban en la superficie de un pequeño sitio, no más grande que un lugar de estacionamiento para un auto compacto, a una milla del campamento. La cena podría esperar.



Con veinticuatro horas de luz en el verano ártico, no tuvimos que preocuparnos por la puesta de sol, así que tomamos barras de chocolate y nos dirigimos al sitio de Jason.

Estaba en la ladera de una colina entre dos hermosos valles fluviales y, como Jason había descubierto, estaba cubierto por una alfombra de huesos de pescado fósiles. Pasamos unas horas recogiendo los fragmentos, tomando fotos y haciendo planes. Este sitio tenía todas las características de lo que estábamos buscando. Volvimos al día siguiente con un nuevo objetivo: encontrar la capa exacta de roca que contenía los huesos.

El truco era identificar la fuente del lío de fragmentos de hueso de Jason, nuestra única esperanza de encontrar esqueletos intactos. El problema era el entorno del Ártico.

Cada invierno, la temperatura desciende a menos 40 grados Fahrenheit. En verano, cuando el sol nunca se pone, la temperatura sube a casi 50 grados. El ciclo de congelación-descongelación resultante desmenuza las rocas y fósiles de la superficie.

Cada invierno se enfrían y se encogen; cada verano se calientan y se expanden. A medida que se encogen y se hinchan con cada estación durante miles de años en la superficie, los huesos se desmoronan. Enfrentados a una masa desordenada de huesos esparcidos por la colina, no pudimos identificar ninguna capa de roca obvia como su fuente. Pasamos varios días siguiendo los rastros de los fragmentos, cavando pozos de prueba, prácticamente usando nuestros martillos geológicos como varil as de buceo para ver dónde en el acantilado los huesos estaban emergiendo. Después de cuatro días, expusimos la capa y finalmente encontramos esqueleto sobre esqueleto de peces fósiles, a menudo uno encima de otro. Pasamos parte de dos veranos exponiendo estos peces.

Aquí es donde trabajamos: sur de la Isla Ellesmere, en el Territorio de Nunavut, Canadá, a 1.000 mil as del Polo Norte.

Un nuevo fracaso: todos los peces que encontramos eran especies bien conocidas que habían sido recolectadas en sitios de edad similar en Europa Oriental. Para colmo, estos peces no estaban muy relacionados con los animales terrestres. En 2004, decidimos intentarlo una vez más. Esta era una situación de vida o muerte. Las expediciones al

Ártico eran prohibitivamente caras y, a falta de un descubrimiento notable, tendríamos que dejarlo.

Todo cambió en un período de cuatro días a principios de julio de 2004. Estaba dando vueltas a la roca en el fondo de la cantera, agrietando el hielo más a menudo que la roca.

Rompí el hielo y vi algo que nunca olvidaré: un parche de escamas que no se parece a nada que hayamos visto en la cantera. Este parche condujo a otra mancha cubierta de hielo. Parecía un conjunto de mandíbulas. Sin embargo, no se parecían a las mandíbulas de ningún pez que yo hubiera visto. Parecía como si estuvieran conectadas a una cabeza plana.

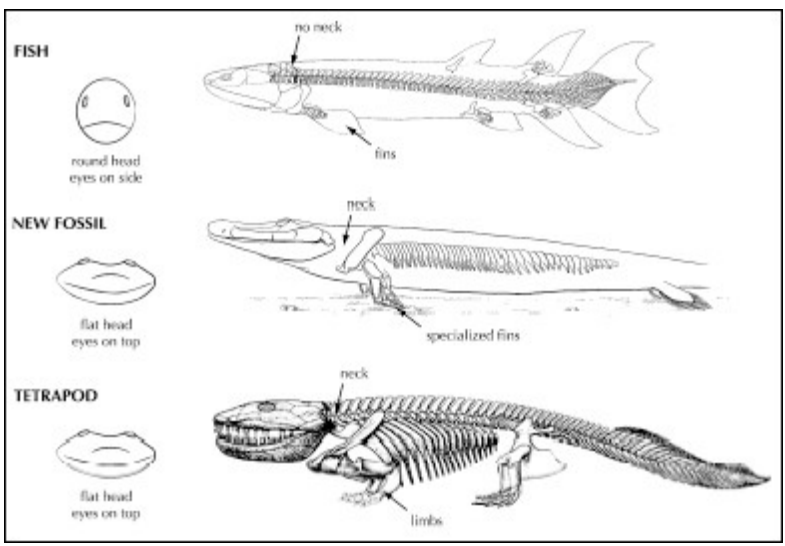
Un día más tarde, mi colega Steve Gatesy estaba lanzando rocas en la cima de la cantera. Steve sacó una roca del tamaño de un puño para revelar el hocico de un animal que lo miraba. Al igual que mi pez cubierto de hielo en el fondo de la fosa, tenía una cabeza plana. Era nuevo e importante. Pero a diferencia de mi pez, el de Steve tenía un

gran potencial. Estábamos mirando la parte delantera, y con suerte el resto del esqueleto podría estar a salvo en el acantilado. Steve pasó el resto del verano removiendo roca poco a poco para poder llevar el esqueleto entero al laboratorio y limpiarlo. El magistral trabajo de Steve con este espécimen llevó a la recuperación de uno de los mejores fósiles descubiertos hasta la fecha en la transición agua-tierra.

Los especímenes que trajimos al laboratorio de casa eran poco más que rocas con fósiles en su interior. En el transcurso de dos meses, la roca fue removida pieza por pieza, a menudo manualmente con herramientas dentales o pequeños picos por los preparadores en el laboratorio. Cada día se revelaba un nuevo trozo de la anatomía de la criatura fósil. Casi cada vez que una gran sección era expuesta, aprendíamos algo nuevo sobre el origen de los animales terrestres.

Lo que vimos emerger gradualmente de estas rocas durante el otoño de 2004 fue un hermoso intermedio entre los peces y los animales terrestres. Los peces y los animales terrestres difieren en muchos aspectos. Los peces tienen cabezas cónicas, mientras que los primeros animales terrestres tienen cabezas casi planas como las de los cocodrilos, con los ojos en la parte superior. Los peces no tienen cuello: sus hombros están unidos a sus cabezas por una serie de placas óseas. Los primeros animales terrestres, como todos sus descendientes, tienen cuello, lo que significa que sus cabezas pueden doblarse independientemente de sus hombros.

Hay otras grandes diferencias. Los peces tienen escamas en todo el cuerpo, los animales terrestres no. También, y de manera importante, los peces tienen aletas, mientras que los animales terrestres tienen extremidades con dedos de las manos, los pies, las muñecas y los tobillos. Podemos continuar estas comparaciones y hacer una lista muy larga de las formas en que los peces se diferencian de los animales terrestres.



El proceso de encontrar fósiles comienza con una masa en una roca que se retira gradualmente con el tiempo. Aquí muestro un fósil mientras viaja del campo al laboratorio y es cuidadosamente preparado como un espécimen: el esqueleto del nuevo animal. Fotografía en la parte superior izquierda del autor; otras fotografías cortesía de Ted Daeschler, Academia de Ciencias Naturales de Filadelfia.

Pero nuestra nueva criatura rompió la distinción entre estos dos tipos de animales.

Como un pez, tiene escamas en el lomo y aletas con telarañas. Pero, como los primeros animales terrestres, tiene una cabeza y un cuello planos. Y, cuando miramos dentro de la aleta, vemos huesos que corresponden a la parte superior del brazo, el antebrazo, incluso partes de la muñeca. Las articulaciones también están ahí: es un pez con las articulaciones del hombro, codo y muñeca. Todo dentro de una aleta con correas.

Prácticamente todos los rasgos que esta criatura comparte con las criaturas terrestres parecen muy primitivos. Por ejemplo, la forma y varias crestas en el hueso del "brazo" superior del pez, el húmero, parecen en parte peces y en parte anfibios. Lo mismo ocurre con la forma del cráneo y el hombro.

Nos llevó seis años encontrarlo, pero este fósil confirmó una predicción de la paleontología: no sólo el nuevo pez era un intermediario entre dos tipos diferentes de animales, sino que también lo habíamos encontrado *en el período de tiempo correcto de la historia de la Tierra* y *en el entorno antiguo correcto.* La respuesta vino de rocas de 375 millones de años de antigüedad, formadas en antiguos arroyos.

Esta figura lo dice todo. *Tiktaalik* es un intermediario entre los peces y los animales terrestres primitivos.

Como los descubridores de la criatura, Ted, Farish y yo tuvimos el privilegio de darle un nombre científico formal. Queríamos que el nombre reflejara la procedencia del pez en el Territorio Nunavut del Ártico y la deuda que teníamos con el pueblo inuit por el permiso para trabajar allí. Contratamos al Consejo de Ancianos de Nunavut, formalmente conocido como el Inuit Qaujimajatuqangit Katimajiit, para que le diera un nombre en el idioma inuktitut. Mi preocupación obvia era que un comité llamado Inuit Qaujimajatuqangit Katimajiit no propusiera un nombre científico que pudiéramos pronunciar. Les envié una foto del fósil, y los ancianos hicieron dos sugerencias, *Siksagiaq* y *Tiktaalik.* Elegimos *Tiktaalik* por su relativa facilidad de pronunciación para la lengua no inuktitutera y por su significado en inuktitut: "gran pez de agua dulce".

Tiktaalik fue la noticia principal en varios periódicos al día siguiente de que se anunciara el hallazgo en abril de 2006, incluidos los titulares de prensa en lugares como el *New York Times.* Esta atención dio lugar a una semana como ninguna otra en mi vida normalmente tranquila. Aunque para mí el mejor momento de todo el bombardeo mediático fue no ver las caricaturas políticas o leer la cobertura editorial y las acaloradas discusiones en los blogs. Tuvo lugar en el preescolar de mi hijo.

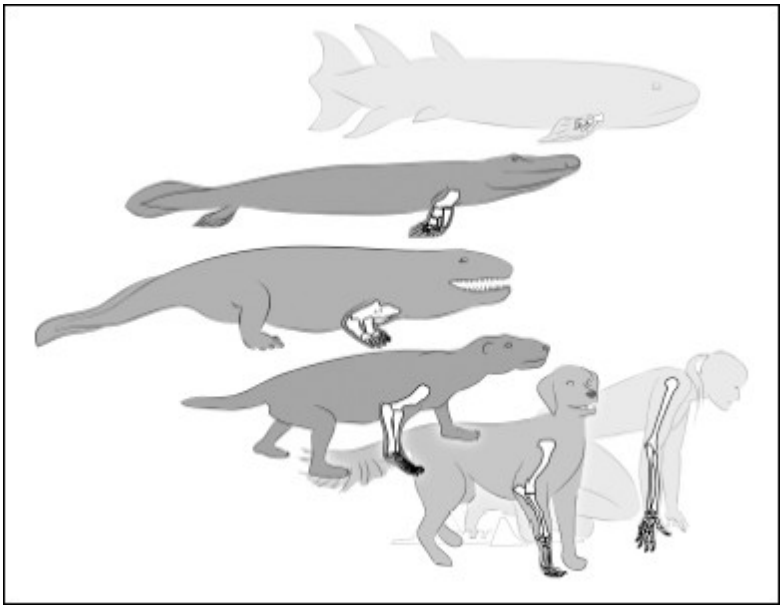
En medio del alboroto de la prensa, la maestra de preescolar de mi hijo me pidió que trajera el fósil y lo describiera. Traje obedientemente un elenco de *Tiktaalik* a la clase de Nathaniel, preparándome para el caos que se produciría. Los veinticuatro y cinco años se comportaron sorprendentemente bien cuando describí cómo habíamos trabajado en el Ártico para encontrar el fósil y les mostré los dientes afilados del animal.

Luego les pregunté qué pensaban que era. Las manos se levantaron. El primer niño dijo que era un cocodrilo o un caimán. Cuando le preguntaron por qué, dijo que como un cocodrilo o un lagarto tiene una cabeza plana con ojos en la parte superior. También tiene dientes grandes. Otros niños comenzaron a expresar su desacuerdo. Escogiendo la mano levantada de uno de estos niños, escuché: No, no, no es un cocodrilo, es un pez, porque tiene escamas y aletas. Otro niño gritó: "Tal vez sea ambas cosas". El mensaje de *Tiktaalik* es tan sencillo que hasta los niños de preescolar pueden verlo.

Para nuestros propósitos, hay una visión aún más profunda de *Tiktaalik.* Este pez no sólo nos habla de los peces, sino que también contiene un pedazo de nosotros. La búsqueda de esta conexión es lo que me llevó al Ártico en primer lugar.

¿Cómo puedo estar tan seguro de que este fósil dice algo sobre mi propio cuerpo?

Considere el cuello de *Tiktaalik.* Todos los peces anteriores a *Tiktaalik* tienen un conjunto de huesos que unen el cráneo al hombro, de modo que cada vez que el animal dobló su cuerpo, también dobló su cabeza. *Tiktaalik* es diferente. La cabeza está completamente libre del hombro. Todo este arreglo es compartido con los anfibios, reptiles, aves y mamíferos, incluyéndonos a nosotros. Todo el cambio puede ser rastreado a la pérdida de unos pocos huesos pequeños en un pez como *Tiktaalik.*



Rastreando los huesos de los brazos desde los peces hasta los humanos.

Puedo hacer un análisis similar para las muñecas, costillas, orejas y otras partes de nuestro esqueleto, todos estos rasgos pueden ser rastreados hasta un pez como este.

Este fósil es tan parte de nuestra historia como los homínidos africanos, como el *Australopithecus afarensis,* el famoso "Lucy". Viendo a Lucy, podemos entender nuestra historia como primates altamente avanzados. Ver a *Tiktaalik* es ver nuestra historia como peces.

Entonces, ¿qué hemos aprendido? Nuestro mundo está tan ordenado que podemos usar un paseo por un zoológico para predecir los tipos de fósiles que se encuentran en las diferentes capas de rocas alrededor del mundo. Esas predicciones pueden l evar a descubrimientos de fósiles que nos hablen de eventos antiguos en la historia de la vida.

El registro de esos eventos permanece dentro de nosotros, como parte de nuestra organización anatómica.

Lo que no he mencionado es que también podemos rastrear nuestra

historia dentro de nuestros genes, a través del ADN. Este registro de nuestro pasado no se encuentra en las rocas del mundo; se encuentra en cada célula dentro de nosotros. Usaremos tanto los fósiles como los genes para contar nuestra historia, la historia de la fabricación de nuestros cuerpos.

CAPÍTULO DOS

CONSEGUIR UNA SUJECIÓN

Las imágenes del laboratorio de anatomía de la escuela de medicina son imposibles de olvidar. Imagina que entras en una habitación donde pasarás varios meses desmontando un cuerpo humano capa por capa, órgano por órgano, todo ello como una forma de aprender decenas de miles de nuevos nombres y estructuras corporales.

En los meses anteriores a mi primera disección humana, me preparé tratando de imaginar lo que vería, cómo reaccionaría y qué sentiría. Resultó que mi mundo imaginado no me preparó de ninguna manera para la experiencia. El momento en que quitamos la sábana y vimos el cuerpo por primera vez no fue tan estresante como esperaba. Debíamos diseccionar el pecho, así que lo expusimos dejando la cabeza, brazos y piernas envueltos en gasa impregnada de conservantes. Los tejidos no parecían muy humanos. Habiendo sido tratado con varios conservantes, el cuerpo no sangraba al ser cortado, y la piel y los órganos internos tenían la consistencia del caucho. Comencé a pensar que el cadáver se parecía más a una muñeca que a un humano. Pasaron unas semanas mientras exponíamos los órganos del pecho y el abdomen. Llegué a pensar que era un profesional; habiendo visto ya la mayoría de los órganos internos, había desarrol ado una arrogante confianza en mí mismo sobre toda la experiencia. Hice mis disecciones iniciales, hice mis cortes y aprendí la anatomía de la mayoría de los órganos principales. Todo fue muy mecánico, independiente y científico.

Esta cómoda ilusión se rompió bruscamente cuando descubrí la mano. Al desenvolver la gasa de los dedos, al ver por primera vez las articulaciones, las puntas de los dedos y las uñas, descubrí las emociones que se habían ocultado durante las semanas anteriores. No

se trataba de una muñeca o un maniquí, sino de una persona viva que usaba esa mano para llevar y acariciar. De repente, este ejercicio mecánico, la disección, se volvió profunda y emocionalmente personal. Hasta ese momento, estaba ciego a mi conexión con el cadáver. Ya había expuesto el estómago, la vesícula biliar y otros órganos; pero, ¿qué persona cuerda forma una conexión humana al ver una vesícula biliar?

¿Qué es lo que tiene una mano que parece quintaesencialmente humana? La respuesta debe ser, en algún nivel, que la mano es una conexión visible entre nosotros; es una firma para lo que somos y lo que podemos alcanzar. Nuestra capacidad para captar, construir y hacer realidad nuestros pensamientos se encuentra dentro de este complejo de huesos, nervios y vasos.

Lo que más lama la atención al ver el interior de la mano es su compacidad. La bola de tu pulgar, la eminencia de la corona, contiene cuatro músculos diferentes. Gira el pulgar e inclina la mano: diez músculos diferentes y al menos seis huesos diferentes trabajan al unísono. Dentro de la muñeca hay al menos ocho pequeños huesos que se mueven uno contra otro. Dobla la muñeca, y estarás usando un número de músculos que empiezan en el antebrazo, extendiéndose a los tendones a medida que bajan por el brazo para terminar en la mano. Incluso el movimiento más simple implica una compleja interacción entre muchas partes empaquetadas en un espacio pequeño.

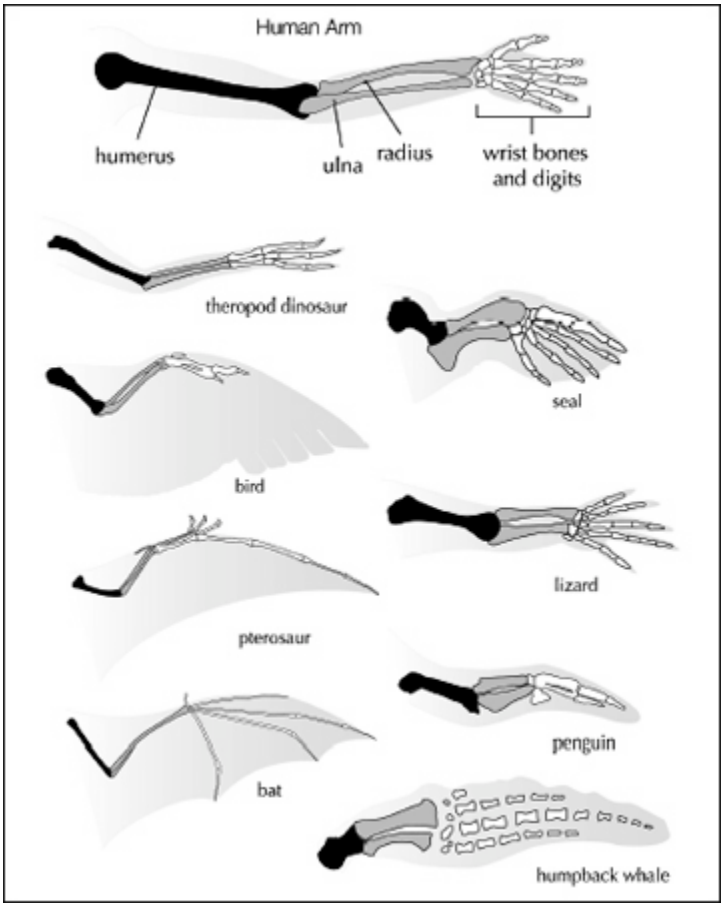
La relación entre la complejidad y la humanidad en nuestras manos ha fascinado a los científicos durante mucho tiempo. En 1822, el eminente cirujano escocés Sir Charles Bell escribió el clásico libro sobre la anatomía de las manos. El título lo dice todo: *La mano, su mecanismo y las dotaciones vitales como diseño evidente.* Para Bell, la estructura de la mano era "perfecta" porque era compleja y estaba idealmente dispuesta para la forma en que vivimos. A sus ojos, esta perfección diseñada sólo podía tener un origen divino.

El gran anatomista Sir Richard Owen fue uno de los líderes científicos en esta búsqueda del orden divino dentro de los cuerpos. Tuvo la suerte de ser un anatomista a mediados de 1800, cuando todavía había tipos de animales completamente nuevos por descubrir viviendo en los confines de la tierra. A medida que más y más partes del mundo eran exploradas por los occidentales, todo tipo de criaturas exóticas

volvían a los laboratorios y museos. Owen describió el primer gorila, traído de expediciones a África central. Acuñó el nombre de "dinosaurio" para un nuevo tipo de criatura fósil descubierta en las rocas de Inglaterra. Su estudio de estas extrañas nuevas criaturas le dio una visión especial: comenzó a ver importantes patrones en el aparente caos de la diversidad de la vida.

Owen descubrió que nuestros brazos y piernas, nuestras manos y pies, encajan en un esquema mayor. Vio lo que los anatomistas anteriores a él habían sabido desde hace mucho tiempo, que hay un patrón en el esqueleto de un brazo humano: un hueso en la parte superior del brazo, dos huesos en el antebrazo, un montón de nueve pequeños huesos en las muñecas, y luego una serie de cinco barras que hacen los dedos. El patrón de los huesos de la pierna humana es muy similar: un hueso, dos huesos, muchas glóbulos y cinco dedos del pie. Al comparar este patrón con la diversidad de esqueletos en el mundo, Owen hizo un descubrimiento notable.

El genio de Owen no fue que se centrara en lo que hacía que los diferentes esqueletos fueran diferentes. Lo que encontró, y más tarde promovió en una serie de conferencias y volúmenes, fueron *similitudes excepcionales* entre criaturas tan diferentes como las ranas y las personas. Todas las criaturas con extremidades, ya sean alas, aletas o manos, tienen un diseño común. Un hueso, el húmero del brazo o el fémur de la pierna, se articula con dos huesos, que se unen a una serie de pequeñas protuberancias, que se



conectan con los dedos de las manos o de los pies. Este patrón subyace en la arquitectura de todas las extremidades. ¿Quieres hacer un ala de murciélago? Haz los dedos muy largos. ¿Hacer un caballo? Alargar los dedos medios y los dedos de los pies y reducir y perder los externos. ¿Qué tal una pata de rana? Alarga los huesos de la pata y fusiona varios de ellos. Las diferencias entre las criaturas radican en las formas y tamaños de los huesos y en el número de glóbulos, dedos de las manos y de los pies. A pesar de los cambios radicales en lo que hacen las extremidades y en su aspecto, este plano subyacente está siempre presente.

El plan común para todas las extremidades: un hueso, seguido de dos huesos, luego pequeñas manchas, luego los dedos de las manos o los pies.

Para Owen, ver un diseño en las extremidades fue sólo el comienzo:

cuando miró los cráneos y las espinas dorsales, de hecho cuando consideró la arquitectura completa del cuerpo, encontró lo mismo. Hay un diseño fundamental en el esqueleto de todos los animales. Las ranas, los murciélagos, los humanos y los lagartos son sólo variaciones de un tema. Ese tema, para Owen, era el plan del Creador.

Poco después de que Owen anunciara esta observación en su clásica monografía *sobre la naturaleza de los miembros,* Charles Darwin proporcionó una elegante explicación para ello. La razón por la que el ala de un murciélago y el brazo de un humano comparten un patrón esquelético común es porque compartieron un ancestro común. El mismo razonamiento se aplica a los brazos humanos y alas de pájaro, piernas humanas y patas de rana, todo lo que tiene extremidades. Hay una gran diferencia entre la teoría de Owen y la de Darwin: La teoría de Darwin nos permite hacer predicciones muy precisas. Siguiendo a Darwin, esperaríamos encontrar que el proyecto de Owen tiene una historia que será revelada en criaturas sin extremidades. ¿Dónde, entonces, buscamos la historia del patrón de las extremidades? Buscamos en los peces y sus esqueletos de aletas.

VER LOS PECES

En los tiempos de Owen y Darwin, el abismo entre las aletas y las extremidades parecía imposible. Las aletas de los peces no tienen ninguna similitud obvia con las extremidades. En el exterior, la mayoría de las aletas de los peces están compuestas en gran parte por mallas de aletas. Nuestras extremidades no tienen nada parecido a esto, ni tampoco las extremidades de ninguna otra criatura viva hoy en día. Las comparaciones no son más fáciles cuando se quita la malla de la aleta para ver el esqueleto en su interior. En la mayoría de los peces, no hay nada que se pueda comparar con el patrón de Owen de un hueso, dos huesos, glóbulos de lotería, dígitos. Todas las extremidades tienen un solo hueso largo en su base: el húmero en la parte superior del brazo y el fémur en la parte superior de la pierna. En los peces, todo el esqueleto se ve completamente diferente. La base de una aleta típica tiene cuatro o más huesos en su interior.

A mediados del siglo XIX, los anatomistas comenzaron a conocer los misteriosos peces vivos de los continentes del sur. Uno de los primeros fue descubierto por anatomistas alemanes que trabajaban en

Sudamérica. Parecía un pez normal, con aletas y escamas, pero detrás de su garganta había grandes sacos vasculares: los pulmones.

Sin embargo, la criatura tenía escamas y aletas. Tan confundidos estaban los descubridores que llamaron a la criatura *Lepidosiren paradoxa,* "anfibio de escamas paradójicas". Pronto se encontraron otros peces con pulmones, llamados acertadamente peces pulmonados, en África y Australia. Los exploradores africanos trajeron uno a Owen. Científicos como Thomas Huxley y el anatomista Carl Gegenbaur encontraron que el pez pulmón es esencialmente un cruce entre un anfibio y un pez.

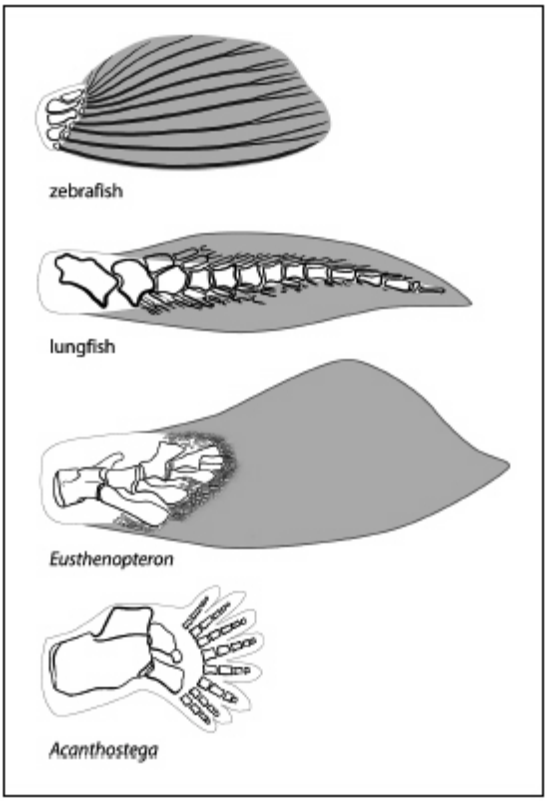
Los locales los encontraron deliciosos.

Un patrón aparentemente trivial en las aletas de estos peces tuvo un profundo impacto en la ciencia. Las aletas de los peces pulmonados tienen en su base un solo hueso que se une al hombro. Para los anatomistas, la comparación era obvia. La parte superior de nuestro brazo tiene un solo hueso, y ese solo hueso, el húmero, se adhiere a nuestro hombro. En el pez pulmonado, tenemos un pez con un húmero. Y, curiosamente, no es un pez cualquiera, es un pez que también tiene pulmones.

¿Coincidencia?

A medida que un puñado de estas especies vivas se conocieron en el siglo XIX, las pistas comenzaron a venir de otra fuente. Como se puede adivinar, estas ideas vinieron de peces antiguos.

Uno de los primeros de estos fósiles vino de las costas de la Península de Gaspésie en Quebec, en rocas de unos 380 millones de años de antigüedad. Al pez se le dio un nombre de trabalenguas, *Eusthenopteron. El Eusthenopteron* tenía una sorprendente mezcla de rasgos que se veían en los anfibios y los peces. De los dos huesos de Owen,



de los dos huesos, de las glóbulos de Lotta, de sus extremidades, *Eusthenopteron* tenía un hueso, dos huesos, pero en una aleta. Algunos peces, entonces, tenían estructuras como las de una extremidad. El arquetipo de Owen no era una parte divina y eterna de toda la vida. Tenía una historia, y esa historia se encontraba en las rocas de la edad devónica, rocas que tienen entre 390 y 360 millones de años. Esta profunda percepción definió un programa de investigación totalmente nuevo con una agenda de investigación totalmente nueva: en algún lugar de las rocas devonianas deberíamos encontrar el origen de los dedos de las manos y los pies.

En la década de 1920, las rocas proporcionaron más sorpresas. Un joven paleontólogo sueco, Gunnar Save-Soderbergh, tuvo la extraordinaria oportunidad de explorar la costa este de Groenlandia en busca de fósiles. La región era tierra incógnita, pero Save-Soderbergh reconoció que tenía enormes depósitos de rocas devonianas. Fue uno de los excepcionales paleontólogos de campo de todos los tiempos, que a lo largo de su corta carrera descubrió notables fósiles con un audaz espíritu explorador y una precisa

atención a los detalles. (Desafortunadamente, murió trágicamente de tuberculosis a una edad temprana, poco después del asombroso éxito de sus expediciones de campo). En expediciones entre 1929 y 1934, el equipo de Save-Soderbergh descubrió lo que, en ese momento, fue etiquetado como un importante eslabón perdido. Periódicos de todo el mundo anunciaron su descubrimiento; editoriales analizaron su importancia; dibujos animados lo anunciaron. Los fósiles en cuestión eran verdaderos mosaicos: tenían cabezas y colas parecidas a las de los peces, pero también tenían extremidades completamente formadas (con dedos de manos y pies), y vértebras extraordinariamente parecidas a las de los anfibios. Después de la muerte de Save-Soderbergh, los fósiles fueron descritos por su colega Erik Jarvik, quien nombró a una de las nuevas especies *Ichthyostega soderberghi* en honor a su amigo.

Las aletas de la mayoría de los peces, por ejemplo, un pez cebra (arriba), tienen grandes cantidades de malla de aletas y muchos huesos en la base. Los peces pulmonados capturaron el interés de la gente porque, como nosotros, tienen un solo hueso en la base del apéndice. El *eustenopterón* (medio) mostró cómo los

---

fósiles empiezan a l enar el hueco; tiene huesos que se comparan con nuestra parte superior del brazo y el antebrazo. *Acanthostega* (abajo) comparte el patrón de huesos del brazo de *Eusthenopteron* con la adición de dígitos completamente formados.

Para nuestra historia, *Ichthyostega* es un poco decepcionante. Es cierto que es un intermediario notable en la mayoría de los aspectos de su cabeza y su espalda, pero dice muy poco sobre el origen de las extremidades porque, como cualquier anfibio, ya tiene dedos de manos y pies. Otra criatura, que recibió poca atención cuando Save-Soderbergh lo anunció, iba a proporcionar conocimientos reales décadas más tarde.

Este segundo animal con extremidades iba a seguir siendo un enigma hasta 1988, cuando una colega paleontóloga mía, Jenny Clack, a la que presentamos en el primer capítulo, volvió a los yacimientos de Save-Soderbergh y encontró más de sus fósiles. La criatura, llamada *Acanthostega gunnari* en la década de 1920 sobre la base de los fragmentos de Save-Soderbergh, ahora revelaba extremidades

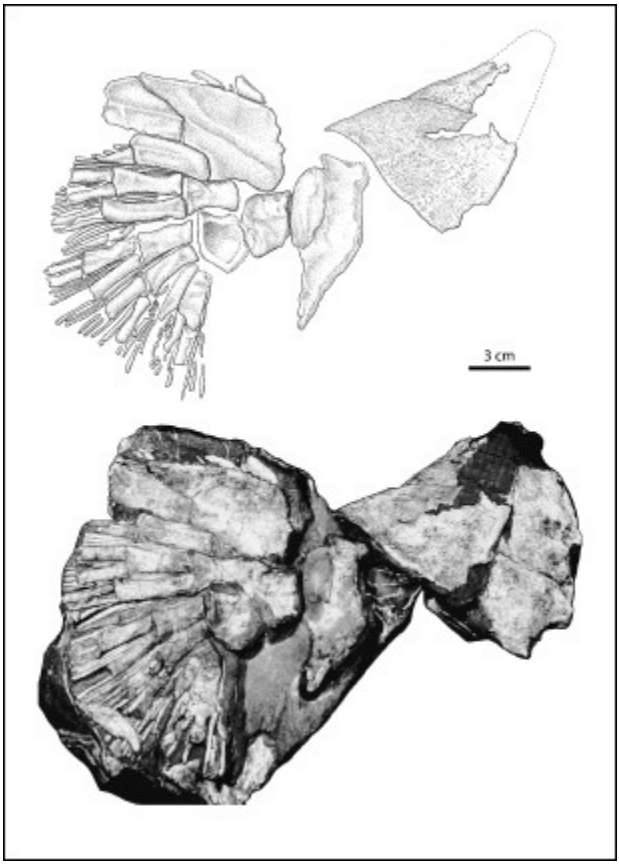
completas, con dedos de manos y pies. Pero también l evaba una verdadera sorpresa: Jenny descubrió que el miembro tenía forma de aleta, casi como la de una foca. Esto le sugirió que las primeras extremidades surgieron para ayudar a los animales a nadar, no a caminar. Esa percepción fue un avance significativo, pero aún quedaba un problema: La *Acanthostega* tenía los dedos completamente formados, con una muñeca real y sin malla de aletas. La *Acanthostega* tenía una extremidad, aunque muy primitiva. La búsqueda de los orígenes de las manos y los pies, las muñecas y los tobillos tenía que ir aún más profundo en el tiempo. Aquí es donde las cosas se mantuvieron hasta 1995.

ENCONTRAR LOS DEDOS Y LAS MUÑECAS DE LOS PECES

En 1995, Ted Daeschler y yo acabábamos de regresar a su casa en Filadelfia después de conducir por todo el centro de Pensilvania en un esfuerzo por encontrar nuevos cortes de carretera. Habíamos encontrado un hermoso corte en la Ruta 15 al norte de Williamsport, donde PennDOT había creado un gigantesco acantilado en arenisca de unos 365 millones de años de antigüedad. La agencia había dinamitado el acantilado y dejado montones de rocas a lo largo de la carretera. Este era un perfecto lugar de caza de fósiles para nosotros, y nos detuvimos para arrastrarnos sobre las rocas, muchas de ellas del tamaño de un pequeño horno de microondas. Algunas tenían escamas de pescado esparcidas por todo el lugar, así que decidimos traer algunas a Filadelfia.

Cuando regresamos a la casa de Ted, su hija de cuatro años, Daisy, salió corriendo a ver a su padre y nos preguntó qué habíamos encontrado.

Al mostrarle a Daisy una de las rocas, de repente nos dimos cuenta de que sobresalía una astilla de aleta de un gran pez. Lo habíamos perdido por completo en el campo. Y, como íbamos a aprender, esta no era una aleta de pez ordinaria: claramente tenía



muchas espinas en su interior. La gente del laboratorio pasó cerca de un mes quitando la aleta de la roca y allí, expuesto por primera vez, había un pez con el patrón de Owen.

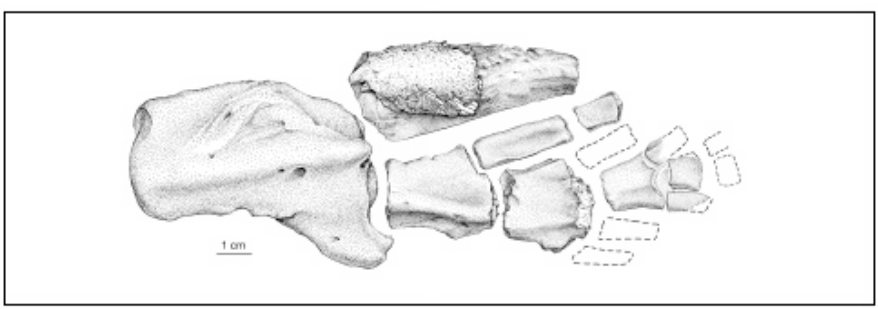
Lo más cercano al cuerpo era un hueso. Este hueso unido a dos huesos. Extendiéndose lejos de la aleta había unas ocho barras. Esto se veía en todo el mundo como un pez con dedos.

Nuestra aleta tenía un conjunto completo de telarañas, escamas, e incluso un hombro parecido al de un pez, pero en el interior había huesos que correspondían a gran parte de la extremidad "estándar". Desafortunadamente, sólo teníamos una aleta aislada. Lo que necesitábamos era encontrar un lugar donde cuerpos enteros de criaturas pudieran ser recuperados intactos. Una sola aleta aislada nunca podría ayudarnos a responder las verdaderas preguntas: ¿Para qué usaba la criatura sus aletas, y las aletas de los peces tenían huesos y articulaciones que funcionaban como las nuestras? La respuesta sólo vendría de esqueletos enteros.

Nuestro tentador final. Lamentablemente, sólo encontramos este espécimen aislado. Diagrama de Stipple usado con el permiso de Scott Rawlins, Universidad de Arcadia. Foto del autor.

Para ese hallazgo, tuvimos que buscar durante casi diez años. Y no fui el primero en reconocer lo que estábamos buscando. Los primeros fueron dos preparadores de fósiles profesionales, Fred Mullison y Bob Masek. Los preparadores usan herramientas dentales para rascar las rocas que encontramos en el campo y así exponer los fósiles que hay dentro. Puede llevar meses, si no años, para que un preparador convierta una gran roca llena de fósiles como la nuestra en un hermoso espécimen de calidad de investigación.

Durante la expedición de 2004, habíamos recogido tres trozos de roca, cada uno del tamaño de un equipaje de mano, del Devónico de la Isla de Ellesmere. Cada uno contenía un animal de cabeza plana: el que encontré en el hielo en el fondo de la cantera, el espécimen de Steve, y un tercer espécimen que descubrimos en la última semana de la



expedición. En el campo habíamos quitado cada cabeza, dejando suficiente roca intacta a su alrededor para explorar en el laboratorio el resto del cuerpo. Luego las rocas fueron envueltas en yeso para el viaje de regreso a casa. Abrir este tipo de cubiertas de yeso en el laboratorio es como encontrarse con una cápsula del tiempo. Trozos de nuestra vida en la tundra ártica están ahí, así como las notas de campo y los garabatos que hacemos en el espécimen. Incluso el olor de la tundra sale de estos paquetes cuando abrimos el yeso.

Fred en Filadelfia y Bob en Chicago estaban rascando diferentes rocas al mismo tiempo. De uno de estos bloques árticos, Bob había sacado un pequeño hueso particular en una gran aleta del Pez (aún no lo habíamos llamado *Tiktaalik*). Lo que hacía que esta mancha de hueso

con forma de cubo fuera diferente de cualquier otro hueso de la aleta era una articulación en el extremo que tenía espacios para otros cuatro huesos. Es decir, la mancha se veía espantosamente como un hueso de muñeca, pero las aletas del bloque que Bob estaba preparando estaban demasiado mezcladas para saberlo con seguridad.

La siguiente prueba vino de Filadelfia una semana después. Fred, un mago con sus herramientas dentales, descubrió una aleta entera en su bloque. En el lugar correcto, justo al final de los huesos del antebrazo, la aleta tenía *ese hueso*. Y *ese hueso* unido a otros cuatro más allá. Estábamos mirando el origen de un trozo de nuestro propio cuerpo dentro de este pez de 375 millones de años. Teníamos un pez con una muñeca.

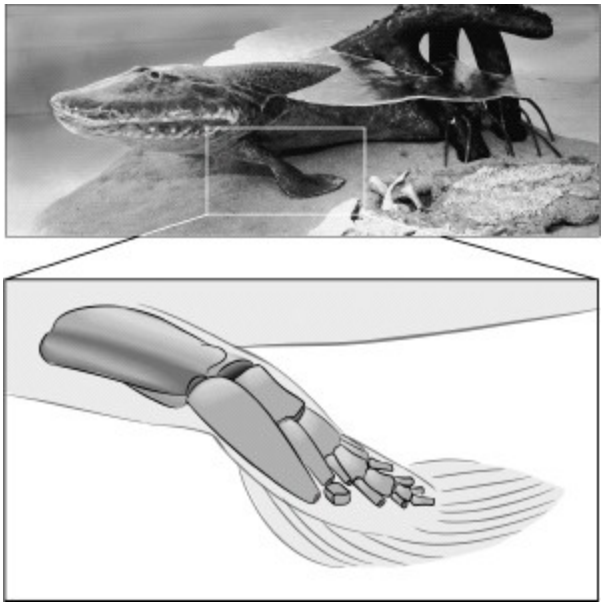
Los huesos de la aleta delantera de *Tiktaalik,* un pez con una muñeca.

En los meses siguientes, pudimos ver gran parte del resto del apéndice. Era parte de la aleta, parte de la extremidad. Nuestro pez tenía una red de aletas, pero dentro había una versión primitiva del arreglo de Owen de un hueso, dos huesos, muchas glóbulos y dígitos. Tal y como predijo la teoría de Darwin: en el momento y lugar adecuados, habíamos encontrado intermediarios entre dos tipos de animales aparentemente diferentes.

Encontrar la aleta fue sólo el comienzo del descubrimiento. La verdadera diversión para Ted, Farish y yo vino de entender lo que hacía la aleta y cómo funcionaba, y de adivinar por qué surgió una articulación de la muñeca en primer lugar. Las soluciones a estos rompecabezas se encuentran en la estructura de los propios huesos y articulaciones.

Cuando desmontamos la aleta de *Tiktaalik*, encontramos algo realmente notable: todas las superficies de las articulaciones estaban extremadamente bien conservadas.

Tiktaalik tiene un hombro, un codo y una muñeca compuestos de los mismos huesos



que la parte superior del brazo, el antebrazo y la muñeca de un humano. Cuando estudiamos la estructura de estas articulaciones para evaluar cómo un hueso se mueve contra otro, vemos que *Tiktaalik* estaba especializado para una función bastante extraordinaria: era capaz de hacer flexiones.

Cuando hacemos flexiones de brazos, nuestras manos están a ras del suelo, nuestros codos están doblados y usamos los músculos del pecho para movernos hacia arriba y hacia abajo. El cuerpo de *Tiktaalik* era capaz de todo esto. El codo era capaz de doblarse como el nuestro, y la muñeca era capaz de doblarse para hacer que la "palma" del pez se recostara contra el suelo. En cuanto a los músculos del pecho, *Tiktaalik* probablemente los tenía en abundancia. Cuando miramos el hombro y la parte inferior del hueso del brazo en el punto donde se habrían conectado, encontramos crestas masivas y cicatrices donde los grandes músculos pectorales se habrían unido. *Tiktaalik* fue capaz de "caer y darnos veinte".

Un modelo a escala real del cuerpo de *Tiktaalik* (arriba) y un dibujo de su aleta (abajo). Esta es una aleta en la que el hombro, el codo y la proto-muñeca eran capaces de realizar un tipo de flexión.

¿Por qué querría un pez hacer una flexión? Ayuda a considerar el resto del animal.

Con una cabeza plana, ojos en la parte superior y costillas, *Tiktaalik* fue probablemente construido para navegar por el fondo y los bajos de los arroyos o estanques, e incluso para flotar en las marismas a lo largo de las orillas. Las aletas capaces de sostener el cuerpo habrían sido muy útiles para un pez que necesitaba maniobrar en todos estos ambientes. Esta interpretación también encaja con la geología del sitio donde encontramos los fósiles de *Tiktaalik.* La estructura de las capas de roca y el patrón de los granos en las propias rocas tienen la firma característica de un depósito que se formó originalmente por un arroyo poco profundo rodeado de grandes marismas estacionales.

¿Pero por qué vivir en estos ambientes? ¿Qué peces poseídos para salir del agua o vivir en los márgenes? Piensa en esto: virtualmente cada pez que nadaba en estos arroyos de 375 millones de años era un depredador de algún tipo. Algunos medían hasta 16 pies de largo, casi el doble del tamaño del *Tiktaalik* más grande . La especie de pez más común que encontramos junto a *Tiktaalik mide* siete pies de largo y tiene una

cabeza tan ancha como una pelota de baloncesto. Los dientes son púas del tamaño de púas de ferrocarril. ¿Te gustaría nadar en estos antiguos arroyos?

No es exagerado decir que este era un mundo de peces que se comen a los peces. Las estrategias para tener éxito en este escenario eran bastante obvias: hacerse grande, conseguir una armadura o salir del agua. Parece que nuestros lejanos antepasados evitaron la lucha.

Pero esta evasión de conflictos significaba algo mucho más profundo para nosotros.

Podemos rastrear muchas de las estructuras de nuestras propias extremidades hasta las aletas de estos peces. Doblar la muñeca hacia atrás y hacia adelante. Abre y cierra tu mano. Cuando haces esto, estás usando articulaciones que aparecieron por primera vez en las aletas de peces como *Tiktaalik.* Antes, estas articulaciones no existían. Más tarde, las encontramos en las extremidades.

Si vamos desde *Tiktaalik* a los anfibios hasta los mamíferos, una cosa queda muy clara: la primera criatura que tuvo los huesos de nuestro brazo, nuestro antebrazo, incluso la muñeca y la palma de la mano, también tenía escamas y mallas de aletas. Esa criatura era un pez.

¿Qué hacemos con el plan de un hueso, dos huesos, un montón de glóbulos, dígitos que Owen atribuyó a un Creador? Algunos peces, por ejemplo el pez pulmonado, tienen un hueso en la base. Otros peces, por ejemplo el *Eusthenopteron, tienen la disposición de un hueso y dos huesos*. Luego hay criaturas como *Tiktaalik,* con un hueso, dos huesos y muchos glóbulos. No hay un solo pez dentro de nuestras extremidades; hay un acuario entero. El plano de Owen fue ensamblado en un pez.

Tiktaalik podría hacer una flexión, pero nunca podría lanzar una pelota de béisbol, tocar el piano o caminar en dos piernas. Es un largo camino desde *Tiktaalik* hasta la humanidad. El hecho importante, y a menudo sorprendente, es que la mayoría de los huesos principales que los humanos usan para caminar, lanzar o agarrar aparecen por primera vez en los animales decenas o cientos de millones de años antes. Los primeros trozos de nuestro brazo y pierna están en peces de 380 millones de años como el *Eusthenopteron. Tiktaalik* revela las primeras etapas de la evolución de nuestra muñeca, palma y área de los dedos. Los primeros dedos verdaderos de las manos y los pies se ven en anfibios de 365 millones de años de edad como la *Acanthostega.* Por último, el complemento completo de los huesos de la muñeca y el tobillo que se encuentran en una mano o un pie humano se ve en reptiles de más de 250 millones de años. El esqueleto básico de nuestras manos y pies emergió durante cientos de millones de años, primero en peces y después en anfibios y reptiles.

Pero, ¿cuáles son los principales cambios que nos permiten usar las manos o caminar en dos piernas? ¿Cómo se producen estos cambios? Veamos dos simples ejemplos de extremidades para obtener algunas respuestas.

Nosotros los humanos, como muchos otros mamíferos, podemos rotar nuestro pulgar en relación con nuestro codo. Esta simple función es muy importante para el uso de nuestras manos en la vida diaria. Imaginen que intentan comer, escribir o lanzar una pelota sin poder girar la mano en relación con el codo. Podemos hacerlo porque un hueso del antebrazo, el radio, gira a lo largo de un punto de pivote en la articulación del codo. La estructura de la articulación del codo está maravillosamente diseñada para esta función. En el extremo de nuestro hueso del brazo superior, el húmero, se encuentra una bola. La punta del radio, que se une aquí, forma un hermoso encaje que encaja en la bola. Esta articulación permite la rotación de nuestra mano, llamada pronación y supinación. ¿Dónde vemos los comienzos

de esta habilidad? En criaturas como *Tiktaalik*. En *Tiktaalik,* el extremo del húmero forma una protuberancia alargada en la que encaja una articulación en forma de copa en el radio. Cuando *Tiktaalik doblaba* su codo, el extremo de su radio rotaba, o se pronunciaba, en relación con el codo. Los refinamientos de esta habilidad se ven en los anfibios y reptiles, donde el extremo del húmero se convierte en una verdadera bola, muy parecida a la nuestra.

Mirando ahora la extremidad posterior, encontramos una característica clave que nos da la capacidad de caminar, una que compartimos con otros mamíferos. A diferencia de los peces y los anfibios, nuestras rodillas y codos están orientados en direcciones opuestas. Esta característica es crítica: piensa en intentar caminar con la rótula hacia atrás. Una situación muy diferente existe en peces como el *Eusthenopteron,* donde los equivalentes de la rodilla y el codo se enfrentan en gran medida en la misma dirección. Comenzamos el desarrollo con pequeños miembros orientados como los de *Eusthenopteron,* con los codos y las rodillas mirando en la misma dirección. A medida que crecemos en el útero, nuestras rodillas y codos rotan para darnos el estado de cosas que vemos en los humanos de hoy en día.

Nuestro patrón bípedo de caminar usa los movimientos de nuestras caderas, rodillas, tobillos y huesos de los pies para impulsarnos hacia adelante en una postura recta, a diferencia de la postura desparramada de criaturas como *Tiktaalik.* Una gran diferencia es la posición de nuestras caderas. Nuestras piernas no se proyectan hacia los lados como las de un cocodrilo, un anfibio o un pez, sino que se proyectan por debajo de nuestro cuerpo. Este cambio de postura se produjo por cambios en la articulación de la cadera, la pelvis y la parte superior de la pierna: nuestra pelvis adquirió forma de cuenco, la cuenca de la cadera se hizo profunda, nuestro fémur ganó su cuello distintivo, la característica que le permite proyectarse por debajo del cuerpo en lugar de a los lados.

¿Significan los hechos de nuestra historia antigua que los humanos no son especiales o únicos entre las criaturas vivientes? Por supuesto que no. De hecho, saber algo sobre los profundos orígenes de la humanidad sólo se suma al hecho notable de nuestra existencia: todas nuestras extraordinarias capacidades surgieron de componentes básicos que evolucionaron en los antiguos peces y otras criaturas. De las partes comunes surgió una construcción muy singular. No estamos

separados del resto del

mundo viviente; somos parte de él hasta nuestros huesos y, como veremos en breve, incluso nuestros genes.

En retrospectiva, el momento en que vi por primera vez la muñeca de un pez fue tan significativo como la primera vez que desenvolví los dedos del cadáver en el laboratorio de anatomía humana. Ambas veces estaba descubriendo una profunda conexión entre mi humanidad y otro ser.

CAPÍTULO TRES

GENES MANUALES

Mientras mis colegas y yo desenterrábamos el primer *Tiktaalik* en el Ártico en julio de 2004, Randy Dahn, un investigador de mi laboratorio, estaba sudando la gota gorda en el lado sur de Chicago haciendo experimentos genéticos en los embriones de tiburones y rayas, primos de las rayas. Probablemente has visto pequeños estuches de huevos negros, conocidos como bolsos de sirena, en la playa. Dentro del bolso una vez puso un huevo con yema, que se convirtió en una raya o raya embrionaria. A lo largo de los años, Randy ha pasado cientos de horas experimentando con los embriones dentro de estos estuches de huevos, a menudo trabajando hasta pasada la medianoche. Durante el fatídico verano de 2004, Randy tomó estos casos e inyectó una versión molecular de la vitamina A en los huevos. Después de eso, dejaba que los huevos se desarrol aran durante varios meses hasta que eclosionaran.

Sus experimentos pueden parecer una forma extraña de pasar la mayor parte del año, y menos aún para que un joven científico se lance a una prometedora carrera científica.

¿Por qué los tiburones? ¿Por qué una forma de vitamina A?

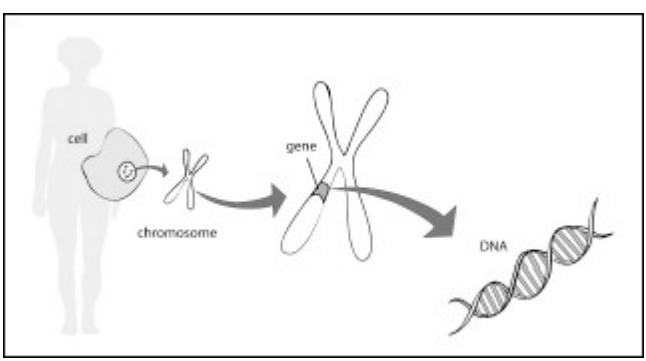
Para que estos experimentos tengan sentido, debemos dar un paso atrás y mirar lo que esperamos que puedan explicar. A lo que realmente llegamos en este capítulo es a la receta, escrita en nuestro

ADN, que construye nuestros cuerpos a partir de un solo óvulo. Cuando el esperma fertiliza un óvulo, ese óvulo fertilizado no contiene una mano diminuta, por ejemplo. La mano se construye a partir de la información contenida en esa única célula. Esto nos lleva a un problema muy profundo. Una cosa es comparar los huesos de nuestras manos con los huesos de las aletas de los peces. ¿Qué pasa si comparas la receta genética que construye nuestras manos con la receta que construye la aleta de un pez? Para encontrar respuestas a esta pregunta, al igual que Randy, seguiremos un rastro de descubrimiento que nos lleva de nuestras manos a las aletas de los tiburones e incluso a las alas de las moscas.

Como hemos visto, cuando descubrimos criaturas que revelan versiones diferentes y a menudo más simples de nuestros cuerpos dentro de los suyos, se abre una ventana maravillosamente directa al pasado distante. Pero hay una gran limitación para trabajar con fósiles. No podemos hacer experimentos con animales muertos hace mucho tiempo.

Los experimentos son geniales porque podemos manipular algo para ver los resultados.

Por esta razón, mi laboratorio se divide directamente en dos: la mitad se dedica a los fósiles, la otra mitad a los embriones y al ADN. La vida en mi laboratorio puede ser



esquizofrénica. El armario cerrado que contiene las muestras de *Tiktaalik* está adyacente al congelador que contiene nuestras preciosas muestras de ADN.

Los experimentos con el ADN tienen un enorme potencial para revelar el interior de los peces. ¿Qué pasaría si pudieras hacer un experimento en el que trataras el embrión de un pez con varios productos químicos

y realmente cambiaras su cuerpo, haciendo que parte de su aleta pareciera una mano? ¿Y si pudieras mostrar que los genes que construyen la aleta de un pez son virtualmente los mismos que construyen nuestras manos?

Empezamos con un aparente rompecabezas. Nuestro cuerpo está compuesto por cientos de tipos de células diferentes. Esta diversidad celular le da a nuestros tejidos y órganos sus distintas formas y funciones. Las células que forman nuestros huesos, nervios, tripas, etc. se ven y se comportan de manera completamente diferente. A pesar de estas diferencias, hay una profunda similitud entre todas las células de nuestro cuerpo: todas ellas contienen exactamente el mismo ADN. Si el ADN contiene la información para construir nuestros cuerpos, tejidos y órganos, ¿cómo es que células tan diferentes como las que se encuentran en los músculos, nervios y huesos contienen el mismo ADN?

La respuesta está en entender qué pedazos de ADN (los genes) se activan realmente en cada célula. Una célula de la piel es diferente de una neurona porque en cada célula están activos diferentes genes. Cuando un gen se activa, produce una proteína que puede afectar al aspecto de la célula y a su comportamiento. Por lo tanto, para entender qué hace que una célula del ojo sea diferente de una célula de los huesos de la mano, necesitamos saber acerca de los interruptores genéticos que controlan la actividad de los genes en cada célula y tejido.

Aquí está el hecho importante: estos interruptores genéticos ayudan a ensamblarnos.

En la concepción, empezamos como una sola célula que contiene todo el ADN necesario para construir nuestro cuerpo. El plan para todo el cuerpo se desarrolla a través de las instrucciones contenidas en esta única célula microscópica. Para pasar de este óvulo generalizado a un humano completo, con trillones de células especializadas organizadas de la forma correcta, es necesario activar y desactivar baterías enteras de genes en las etapas adecuadas de desarrol o. Como un concierto compuesto de notas individuales tocadas por muchos instrumentos, nuestros cuerpos son una composición de genes individuales que se encienden y apagan dentro de cada célula durante nuestro desarrollo.

Los genes son estiramientos de ADN contenidos en cada célula de nuestros cuerpos.

Esta información es una ayuda para aquellos que trabajan para entender los cuerpos, porque ahora podemos comparar la actividad de diferentes genes para evaluar qué tipos de cambios están involucrados en el origen de nuevos órganos. Tomemos las extremidades, por ejemplo. Cuando comparamos el conjunto de genes activos en el desarrollo de una aleta de pez con aquellos activos en el desarrollo de una mano humana, podemos catalogar las diferencias genéticas entre las aletas y las extremidades. Este tipo de comparación nos da algunos culpables probables: los cambios genéticos que pueden haber cambiado durante el origen de las extremidades.

Podemos entonces estudiar lo que estos genes están haciendo en el embrión y cómo podrían haber cambiado. Incluso podemos hacer experimentos en los que manipulamos los genes para ver cómo cambian realmente los cuerpos en respuesta a diferentes condiciones o estímulos.

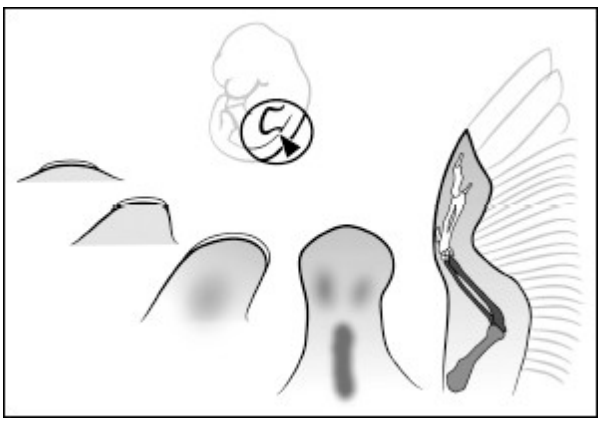
Para ver los genes que construyen nuestras manos y pies, necesitamos tomar una página del guión del programa de TV *CSI: Investigación de la Escena del Crimen, empezar por el* cuerpo y abrirnos camino. Comenzaremos mirando la estructura de nuestros miembros, y nos acercaremos hasta los tejidos, células y genes que lo hacen.

HACER MANOS

Nuestros miembros existen en tres dimensiones: tienen una parte superior e inferior, un lado meñique y un lado pulgar, una base y una punta. Los huesos de las puntas, en nuestros dedos, son diferentes de los huesos del hombro. Del mismo modo, nuestras manos son diferentes de un lado a otro. Nuestros meñiques tienen una forma diferente a la de nuestros pulgares. El Santo Grial de nuestra investigación sobre el desarrollo es entender qué genes diferencian los distintos huesos de nuestra extremidad, y qué controla el desarrollo en estas tres dimensiones. ¿Qué ADN hace que un meñique sea diferente de un pulgar? ¿Qué hace que nuestros dedos se diferencien de los huesos de nuestros brazos? Si podemos entender los genes que

controlan tales patrones, estaremos al tanto de la receta que nos construye.

Todos los interruptores genéticos que hacen que los dedos de las manos, de los brazos y de los pies hagan lo suyo durante la tercera y octava semana después de la concepción. Los miembros comienzan su desarrollo como pequeños brotes que se extienden desde nuestros cuerpos embrionarios. Los brotes crecen durante dos semanas, hasta que la punta forma una pequeña paleta. Dentro de esta paleta hay millones de células que finalmente darán lugar al esqueleto, los nervios y los músculos que tendremos para el resto de nuestras vidas.



El desarrollo de un miembro, en este caso un ala de pollo. Todas las etapas clave en el desarrol o de un esqueleto de ala ocurren dentro del huevo.

Para estudiar cómo surge este patrón, necesitamos mirar a los embriones y a veces interferir con su desarrollo para evaluar lo que sucede cuando las cosas van mal.

Además, tenemos que mirar a los mutantes y a sus estructuras internas y genes, a menudo haciendo poblaciones enteras de mutantes a través de una cuidadosa crianza.

Obviamente, no podemos estudiar a los humanos de esta manera. El desafío para los pioneros en este campo fue encontrar los animales que podrían ser ventanas útiles para nuestro propio desarrollo. Los primeros embriólogos experimentales interesados en las extremidades

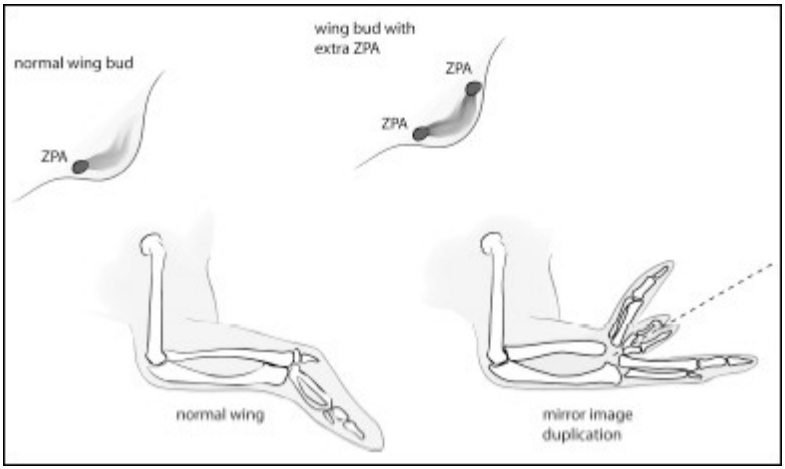
en los años 30 y 40 se enfrentaron a varios problemas. Necesitaban un organismo en el que las extremidades fueran accesibles para la observación y la experimentación. El embrión tenía que ser relativamente grande, para que pudieran realizar procedimientos quirúrgicos en él. Lo más importante era que el embrión debía crecer en un lugar protegido, en un contenedor que lo protegiera de los empujones y otras perturbaciones ambientales. También, y de manera crítica, los embriones tenían que ser abundantes y estar disponibles durante todo el año. La solución obvia a esta necesidad científica está en su tienda de comestibles local: huevos de gallina.

En los años 50 y 60, varios biólogos, entre ellos Edgar Zwilling y John Saunders, hicieron experimentos extraordinariamente creativos con huevos de gallina para entender cómo se forma el patrón del esqueleto. Esta fue una era de rebanadas y dados.

Se cortaban los embriones y se movían varios tejidos para ver el efecto que esto tenía en el desarrollo. El enfoque implicaba una microcirugía muy cuidadosa, manipulando parches de tejido de no más de un milímetro de grosor. De esta manera, al mover los tejidos en el miembro en desarrollo, Saunders y Zwilling descubrieron algunos de los mecanismos clave que construyen miembros tan diferentes como alas de pájaro, aletas de ballena y manos humanas.

Descubrieron que dos pequeños parches de tejido controlan esencialmente el desarrollo del patrón de los huesos dentro de las extremidades. Una franja de tejido en el extremo del brote del miembro es esencial para *todo el desarrollo del miembro*.

Quítenla, y el desarrol o se detiene. Quítenla pronto, y nos quedaremos con sólo la parte superior del brazo, o un trozo de brazo. Quítela un poco más tarde, y terminaremos con la parte superior del brazo y el antebrazo. Quítalo incluso más tarde, y el brazo está casi completo, excepto que los dedos son cortos y deformados.



Otro experimento, inicialmente realizado por Mary Gasseling en el laboratorio de John Saunders, condujo a una nueva y poderosa línea de investigación. Tomar un pequeño trozo de tejido de lo que se convertirá en el lado meñique de un brote de un miembro, en una etapa temprana de desarrollo, y transplantarlo al lado opuesto, justo debajo de donde se formará el primer dedo. Deja que el polluelo se desarrol e y forme un ala. El resultado sorprendió a casi todos. El ala se desarrolló normalmente, excepto que también tenía un juego *completo de dedos duplicados.* Aún más notable fue el patrón de los dedos: los nuevos dedos eran imágenes espejo del conjunto normal. Obviamente, algo dentro de ese parche de tejido, alguna molécula o gen, fue capaz de dirigir el desarrollo del patrón de los dedos. Este resultado generó una ventisca de nuevos experimentos, y aprendimos que este efecto puede ser imitado por una variedad de otros medios. Por ejemplo, tomar un embrión de pollo y aplicar un poco de vitamina A en su yema, o simplemente inyectar vitamina A en el huevo, y dejar que el embrión se desarrolle. Si se suministra la vitamina A en la concentración y el estadio adecuados, se obtendrá la misma duplicación en imagen espejo que Gasseling, Saunders y Zwilling obtuvieron en los experimentos de injerto. Este parche de tejido fue llamado la zona de actividad polarizante (ZPA). Esencialmente, la ZPA es un parche de tejido que causa que el lado meñique sea diferente del lado del pulgar. Obviamente los pollitos no tienen un meñique y un pulgar. La terminología que utilizamos es la de numerar los dígitos, correspondiendo nuestro meñique al dígito cinco de otros animales y nuestro pulgar al dígito uno.

Al mover un pequeño parche de tejido llamado ZPA, los dedos se duplican.

La ZPA atrajo el interés porque parecía, de alguna manera, controlar la formación de los dedos de las manos y de los pies. ¿Pero cómo? Algunas personas creían que las células de la ZPA hacían una molécula que luego se extendía a través del miembro para instruir a las células a hacer diferentes dedos. La propuesta clave era que el factor importante era la concentración de esta molécula sin nombre. En las zonas cercanas a la ZPA, donde hay una alta concentración de esta molécula, las células responderían haciendo un dedo meñique. En el lado opuesto de la mano en desarrollo, más lejos de la ZPA para que la molécula fuera más difusa, las células responderían haciendo un dedo pulgar. Las células del medio responderían cada una de acuerdo a la concentración de esta molécula para hacer el segundo, tercer y cuarto dedos.

Esta idea dependiente de la concentración podría ser probada. En 1979, Denis Summerbell colocó un trozo de papel de aluminio extremadamente pequeño entre el

---

parche de ZPA y el resto de la extremidad. La idea era utilizar esta barrera para evitar que cualquier tipo de molécula se difundiera desde el ZPA hacia el otro lado.

Summerbell estudió lo que le sucedió a las células de cada lado de la barrera. Las células del lado de la ZPA formaban dígitos. Las células del lado opuesto a menudo no formaban dígitos; si lo hacían, los dígitos estaban muy mal formados. La conclusión era obvia. Algo emanaba de la ZPA que controlaba cómo se formaban los dígitos y cómo se veían. Para identificar ese algo, los investigadores necesitaban mirar el ADN.

LA RECETA DE ADN

Ese proyecto se dejó a una nueva generación de científicos. No fue hasta la década de 1990, cuando se dispuso de nuevas técnicas moleculares, que se desentrañó el control genético para el funcionamiento de la ZPA.

Un gran avance ocurrió en 1993, cuando el laboratorio de Cliff Tabin

en Harvard comenzó a buscar los genes que controlan el ZPA. Su presa fueron los mecanismos moleculares que dieron a la ZPA su capacidad de hacer nuestro meñique diferente de nuestro pulgar. Para cuando su grupo comenzó a trabajar a principios de los años 90, una serie de experimentos como los que he descrito nos llevaron a creer que algún tipo de molécula causó todo esto. Esta era una gran teoría, pero nadie sabía qué era esta molécula. La gente proponía una molécula tras otra, sólo para descubrir que ninguna estaba a la altura. Finalmente, el laboratorio de Tabin l egó a una noción novedosa, y muy relevante para el tema de este libro. Busquen las moscas para la respuesta.

Los experimentos genéticos de la década de 1980 habían revelado el maravilloso patrón de actividad genética que esculpe el cuerpo de una mosca a partir de un huevo unicelular. El cuerpo de una mosca de la fruta está organizado de adelante hacia atrás, con la cabeza en la parte delantera y las alas en la parte trasera. Baterías enteras de genes se encienden y apagan durante el desarrol o de la mosca, y este patrón de actividad genética sirve para demarcar las diferentes regiones de la mosca.

Tabin no lo sabía en ese momento, pero otros dos laboratorios, los de Andy MacMahon y Phil Ingham, ya habían l egado a la misma idea general de forma independiente. Lo que surgió fue una colaboración notablemente exitosa entre tres grupos de laboratorios diferentes. Uno de los genes de la mosca llamó la atención de Tabin, McMahon e Ingham. Observaron que este gen hacía que un extremo de un segmento del cuerpo se viera diferente del otro. Los genetistas de la mosca lo l amaron *erizo*. ¿La función del *erizo* en el cuerpo de la mosca - hacer que una región sea diferente de otra - no suena como lo que hace el ZPA al hacer que el meñique sea diferente del pulgar? Ese paralelismo no se perdió en los tres laboratorios. Así que se fueron, buscando un gen de erizo en criaturas como pollos, ratones y peces.

Como los grupos de laboratorio conocían la estructura del gen del erizo *de* la mosca, tenían una imagen de búsqueda que les ayudaba a identificar el gen en los pollos. Cada gen tiene una secuencia distintiva; usando un número de herramientas moleculares, los investigadores pudieron escanear el ADN del pollo para la secuencia del *erizo*. Después de mucho ensayo y error, encontraron un gen de erizo *de pollo*.

Así como los paleontólogos nombran nuevas especies, los genetistas

nombran nuevos genes. Los genetistas de moscas que descubrieron *el erizo lo* nombraron así porque las moscas con una mutación en el gen tenían cerdas que les recordaban a un pequeño erizo. Tabin, McMahon e Ingham nombraron la versión de pollo del gen erizo sónico *, en honor al videojuego* Sega Génesis.

Ahora viene la pregunta divertida: ¿Qué es lo que hace realmente *Sonic hedgehog en* la extremidad? El grupo de Tabin adhirió un tinte a una molécula que se pegaría al gen, permitiéndoles visualizar dónde está activo el gen en el miembro. Para su gran sorpresa, descubrieron que sólo las células de una pequeña parte del miembro tenían actividad genética: el ZPA.

Así que los siguientes pasos se hicieron obvios. Los patrones de actividad del gen del erizo sónico deberían imitar los del propio tejido ZPA. Recordemos que cuando tratamos el miembro con ácido retinoico, una forma de vitamina A, obtenemos un ZPA activo en el lado opuesto. ¿Adivina qué pasa cuando tratas un miembro con ácido retinoico y luego haces un mapa de dónde está activo el erizo sónico? *Sonic hedgehog* se activa en ambos lados, en el dedo meñique y en el pulgar, igual que la ZPA cuando se trata con ácido retinoico.

Conocer la estructura del pollo *Sonic hedgehog* dio a otros investigadores las herramientas para buscarlo en todo lo que tiene dedos, desde ranas hasta humanos.

Cada animal con extremidades tiene el gen del erizo sónico. Y en cada animal que hemos estudiado, *Sonic hedgehog* está activo en el tejido ZPA. Si *Sonic hedgehog* no se hubiera encendido correctamente durante la octava semana de su propio desarrollo, entonces tendrías dedos adicionales o tu meñique y tu pulgar se verían iguales. Ocasionalmente, cuando las cosas van mal con *Sonic hedgehog,* la mano termina pareciendo una paleta ancha con hasta doce dedos que se parecen.

Ahora sabemos que el erizo *sónico* es uno de los docenas de genes que actúan para esculpir nuestras extremidades desde el hombro hasta la punta de los dedos, encendiéndose y apagándose en el momento adecuado. Sorprendentemente, el trabajo en pollos, ranas y ratones nos decía lo mismo. La receta de ADN para construir la parte superior de los brazos, antebrazos, muñecas y dedos es prácticamente idéntica en todas las criaturas que tienen extremidades.

¿Hasta dónde podemos rastrear a *Sonic hedgehog* y los otros pedazos de ADN que construyen las extremidades? ¿Esta cosa es activa en la construcción del esqueleto de las aletas de los peces? ¿O las manos son genéticamente completamente diferentes de

---

las aletas de los peces? Vimos un pez interior en la anatomía de nuestros brazos y manos. ¿Qué hay del ADN que lo construye?

Entra Randy Dahn con sus bolsos de sirena.

DANDO UNA MANO A LOS TIBURONES

Randy Dahn entró en mi laboratorio con una idea simple pero muy elegante: tratar a los embriones de patines de la misma manera que Cliff Tabin trataba los huevos de gallina. El objetivo de Randy era realizar todos los experimentos en patines que los biólogos de pollos habían realizado con huevos de gallina, desde las cirugías de tejidos de Saunders y Zwilling hasta los experimentos de genes de Cliff Tabin. Los patines se desarrollan en un huevo con una especie de cáscara y una yema. Los patines incluso tienen grandes embriones, como los pollos. Debido a estos hechos convenientes, podríamos aplicar a los patines muchas de las herramientas genéticas y experimentales que la gente ha desarrol ado para entender a los pollos.

¿Qué podríamos aprender comparando el desarrollo de la aleta de un tiburón con el de una pata de pollo? Aún más relevante, ¿qué podríamos aprender sobre nosotros mismos de todo esto?

Los pollos, como mostraron Saunders, Zwilling y Tabin, son una sorprendente buena representación de nuestros propios miembros. Todo lo que fue descubierto por los experimentos de corte e injerto de Saunders y Zwilling y por el trabajo de ADN de Tabin se aplica a nuestros propios miembros también: tenemos un ZPA, tenemos un erizo sónico *,* y ambos tienen una gran influencia en nuestro bienestar. Como vimos, un mal funcionamiento del ZPA o una mutación en el *erizo sónico* puede causar grandes malformaciones en las manos humanas.

Randy quería determinar cuán diferente es el aparato que construye nuestras manos.

¿Qué tan profunda es nuestra conexión con el resto de la vida? ¿La receta que construye nuestras manos es nueva, o también tiene profundas raíces en otras criaturas? Si es así,

¿qué tan profunda?

Los tiburones y sus parientes son las primeras criaturas que tienen aletas con un esqueleto dentro. Idealmente, para responder a la pregunta de Randy, usted querría traer un fósil de tiburón de 400 millones de años de edad al laboratorio, molerlo y mirar su estructura genética. Luego intentarías manipular sus embriones fósiles para saber si el erizo *sónico* está activo en el mismo lugar general que en nuestros miembros hoy en día. Este sería un experimento maravilloso, pero es imposible. No podemos extraer ADN

de fósiles tan antiguos, y, aunque pudiéramos, nunca podríamos encontrar embriones de esos animales fósiles en los que hacer experimentos.

Los tiburones vivos y sus parientes son la siguiente mejor opción. Nadie confundiría nunca una aleta de tiburón con una mano humana: no se podría pedir dos tipos más de apéndices diferentes. No sólo los tiburones y los humanos están muy distantemente relacionados, sino que las estructuras esqueléticas de sus apéndices no se parecen en nada. Nada remotamente similar al patrón de un hueso, dos huesos, muchas manchas, dígitos de Owen está dentro de la aleta de un tiburón. En cambio, los huesos del interior tienen forma de varas, largas y cortas, delgadas y anchas. Los llamamos huesos aunque estén hechos de cartílago (los tiburones y las rayas son conocidos como peces cartilaginosos, porque sus esqueletos nunca se convierten en huesos duros). Si quieres evaluar si el papel del erizo sónico en las extremidades es único para los animales con extremidades, ¿por qué no elegir una especie completamente diferente en casi todos los sentidos? Además, ¿por qué no elegir la especie que es el pez vivo más primitivo con cualquier tipo de apéndice emparejado, ya sea aleta o extremidad? Los tiburones encajan perfectamente en ambos picos.

Nuestro primer problema fue simple. Necesitábamos una fuente confiable para los embriones de tiburones y patines. Los tiburones resultaron difíciles de obtener con cualquier grado de regularidad, pero los patines, sus parientes cercanos, eran otro asunto. Así que

empezamos con los tiburones y usamos patines ya que nuestro suministro de tiburones disminuyó. Encontramos un proveedor que nos enviaba cada mes o dos un lote de veinte o treinta cajas de huevos con embriones dentro. Nos convertimos en un culto de carga virtual mientras esperábamos cada mes por nuestro envío de preciosas cajas de huevos.

El trabajo del grupo de Tabin y otros le dio a Randy pistas importantes para comenzar su búsqueda. Desde el trabajo de Tabin en 1993, la gente había encontrado erizos *sónicos* en varias especies diferentes, desde peces hasta humanos. Con el conocimiento de la estructura del gen, Randy fue capaz de buscar en todo el ADN de la raya y el tiburón el erizo *sónico*. En muy poco tiempo lo encontró: un gen de erizo *sónico de tiburón*.

Las preguntas clave a responder fueron: ¿Dónde está activo *Sonic hedgehog*?, y, aún más importante, ¿Qué está haciendo?

Los estuches de huevos se utilizaron cuando Randy visualizó dónde y cuándo *Sonic hedgehog* está activo en el desarrollo de los patines. Primero estudió si Sonic *hedgehog se activa al* mismo tiempo en el desarrol o de las aletas de los patines que en las extremidades de las gallinas. Sí, lo hace. Luego estudió si se enciende en el tejido de la parte posterior de la aleta, el equivalente a nuestro meñique. Sí, otra vez. Ahora hizo su experimento de vitamina A. Este fue el momento del millón de dólares. Si tratas la extremidad de un pollo o mamífero con este compuesto, obtienes un parche de tejido que tiene actividad de erizo sónico en el lado opuesto, y este resultado se une a una duplicación de los huesos. Randy inyectó el huevo, esperó un día más o menos, y luego comprobó si, como en los pollos, la vitamina A causaba que el erizo *sónico* se activara en el lado opuesto de la extremidad. Lo hizo. Ahora llegó la larga espera. Sabíamos que *Sonic hedgehog* se comportaba de la misma manera en nuestras manos y en las aletas

de los patines y los tiburones. ¿Pero cuál sería el efecto de todo esto en el esqueleto?

Tendríamos que esperar dos meses para la respuesta.

Los embriones se estaban desarrollando dentro de una caja de huevos opaca. Todo lo que podíamos decir era si la criatura estaba viva; el

interior de la aleta era invisible para nosotros.

El resultado final fue un impresionante ejemplo de similitud entre nosotros, los tiburones y los patines: una aleta con forma de espejo. Las aletas dorsales duplicaron sus estructuras en un maravilloso patrón de adelante hacia atrás, del mismo tipo que vimos en los experimentos con las extremidades. Las extremidades duplican la estructura de un miembro. Las aletas de tiburón duplican la estructura de las aletas de un tiburón, al igual que los patines. El erizo *sónico* tiene un efecto similar incluso en los más diferentes tipos de esqueletos de apéndices que se encuentran en la tierra hoy en día.

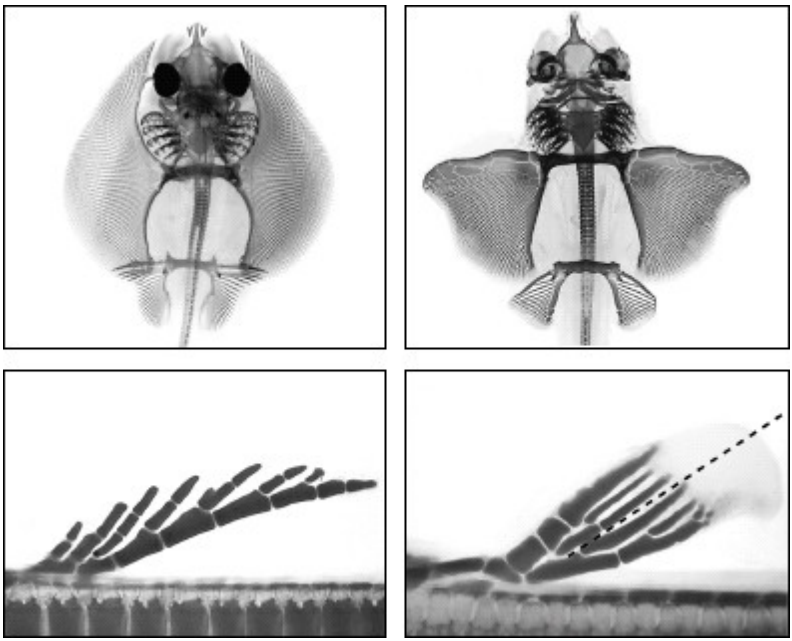
Un efecto del erizo sónico *, como recordarán*, es hacer que los dedos se distingan entre sí. Como vimos con respecto al ZPA, el tipo de dedo que se desarrol a depende de lo cerca que esté el dedo de la fuente de *Sonic hedgehog.* Una aleta de patín normal de adulto contiene muchas varillas esqueléticas, que son todas iguales. ¿Podríamos hacer que estas barras sean diferentes unas de otras, como nuestros dígitos? Randy cogió una pequeña cuenta impregnada con la proteína de Sonic *hedgehog* y la puso entre estas varillas esqueléticas idénticas. La clave de su experimento es que utilizó el ratón Sonic hedgehog . Así que ahora tenemos un verdadero artilugio: un embrión de patín con una cuenta en su interior que va perdiendo gradualmente la proteína de Sonic *hedgehog de ratón*. ¿Tendría esa proteína de ratón algún efecto en un tiburón o en un patín?

Hay dos resultados extremos en un experimento como este. Uno es que no pasa nada.

Esto significaría que los patines son tan diferentes de los ratones que la proteína de erizo sónico no tiene ningún efecto. El otro resultado extremo presentaría un ejemplo impresionante de nuestro pez interior. Este resultado sería que las varil as se desarrollan de manera diferente una de otra, demostrando que *Sonic hedgehog* hace algo similar en los patines y en nosotros. Y no olvidemos que como Randy está usando la proteína de un mamífero, significa que la receta genética sería muy, muy similar.

Las varillas no sólo terminaron viéndose diferentes entre sí, sino que respondieron al erizo sónico *, al igual* que los dedos, en base a cuán cerca estaban de la cuenta de erizo *sónico*: las varil as más cercanas desarrollaron una forma diferente a las más lejanas.

Para colmo, fue la proteína del ratón la que hizo el trabajo tan eficazmente en los patines.



Aletas normales (izquierda) y las aletas tratadas de Randy. Las aletas tratadas mostraban una duplicación en forma de espejo como las alas de pollo. Fotografías cortesía de Randall Dahn, Universidad de Chicago.

El "pez interior" que Randy encontró no era un solo hueso, ni siquiera una sección del esqueleto. El pez interior de Randy estaba en las herramientas biológicas que en realidad construyen las aletas. Experimento tras experimento en criaturas tan diferentes como ratones, tiburones y moscas nos muestra que las lecciones de *Sonic hedgehog* son muy generales. Todos los apéndices, ya sean aletas o extremidades, están construidos por tipos de genes similares. ¿Qué significa esto para el problema que vimos en los dos primeros capítulos, la transición de las aletas de los peces a las extremidades? Significa que esta gran transformación evolutiva no implicó el origen de un nuevo ADN: gran parte del cambio probablemente implicó el uso de antiguos genes, como los que participan en el desarrol o de las aletas de tiburón, en nuevas formas de hacer extremidades con los dedos de las manos y los pies.

Pero hay una belleza más profunda en estos experimentos en las extremidades y las aletas. El laboratorio de Tabin utilizó el trabajo en *moscas* para encontrar un gen en *los pollos* que nos dice sobre los defectos de nacimiento *humanos*. Randy utilizó el descubrimiento del laboratorio de Tabin para decirnos algo sobre nuestras conexiones con los patines . Una "mosca interna" ayudó a encontrar un "pollo interno", lo que finalmente ayudó a Randy a encontrar un "patín interno". Las conexiones entre las criaturas vivas son profundas.

CAPÍTULO CUATRO

DIENTES POR TODAS PARTES

El diente se encoge en la clase de anatomía: pasamos los cinco minutos en él. En el panteón de órganos favoritos, dejaré que cada uno de ustedes haga su lista, los dientes rara vez llegan a los cinco primeros. Sin embargo, el pequeño diente contiene tanto de nuestra conexión con el resto de la vida que es virtualmente imposible entender nuestros cuerpos sin conocer los dientes. Los dientes también tienen un significado especial para mí, porque fue en su búsqueda que aprendí a encontrar fósiles y a dirigir una expedición de fósiles.

El trabajo de los dientes es hacer criaturas más grandes en pedazos más pequeños.

Cuando están unidos a una mandíbula en movimiento, los dientes cortan, cortan en dados y maceran. Las bocas son tan grandes, que los dientes permiten a las criaturas comer cosas más grandes que sus bocas. Esto es particularmente cierto para las criaturas que no tienen manos o garras que puedan triturar o cortar cosas antes de llegar a la boca. Es cierto que los peces grandes tienden a comer peces más pequeños.

Pero los dientes pueden ser el gran ecualizador: los peces más pequeños pueden comerse a los más grandes si tienen buenos dientes. Los peces más pequeños pueden usar sus dientes para raspar las escamas, alimentarse de partículas o sacar trozos enteros de carne de los peces más grandes.

Podemos aprender mucho sobre un animal mirando sus dientes. Las protuberancias, fosas y crestas de los dientes a menudo reflejan la dieta. Los carnívoros, como los gatos, tienen muelas en forma de hoja para cortar la carne, mientras que los comedores de plantas tienen la boca llena de dientes más planos que pueden macerar hojas y nueces.

El valor informativo de los dientes no se perdió en los anatomistas de la historia. El anatomista francés Georges Cuvier se jactó una vez de poder reconstruir el esqueleto completo de un animal a partir de un solo diente. Esto es un poco exagerado, pero el punto general es válido; los dientes son una poderosa ventana al estilo de vida de un animal.

La boca humana revela que somos comedores de todo tipo, ya que tenemos varios tipos de dientes. Nuestros dientes delanteros, los incisivos, son hojas planas especializadas en el corte. Los dientes posteriores, los molares, son más planos, con un patrón distintivo que puede macerar el tejido vegetal o animal. Los premolares, en medio, son de función intermedia entre los incisivos y los molares.

Lo más notable de nuestras bocas es la precisión con la que masticamos. Abrir y cerrar la boca: los dientes siempre se juntan en la misma posición, con los dientes

superiores e inferiores encajando con precisión. Debido a que las cúspides, cuencas y crestas superiores e inferiores coinciden estrechamente, somos capaces de romper la comida con la máxima eficiencia. De hecho, un desajuste entre los dientes superiores e inferiores puede destrozar nuestros dientes y enriquecer a nuestros dentistas.

Los paleontólogos encuentran los dientes maravillosamente informativos. Los dientes son las partes más duras de nuestro cuerpo, porque el esmalte incluye una alta proporción del mineral hidroxiapatita, más alta incluso que la que se encuentra en los huesos. Gracias a su dureza, los dientes son a menudo la parte animal mejor conservada que encontramos en el registro fósil durante muchos períodos de tiempo. Esto es una suerte; ya que los dientes son una gran pista para la dieta de un animal, el registro fósil puede darnos una buena ventana sobre cómo se produjeron las diferentes formas de alimentación. Esto es particularmente cierto en la historia de los mamíferos: mientras que muchos reptiles tienen dientes similares, los de los mamíferos son distintivos. La sección de mamíferos de un típico

curso de paleontología se siente casi como Odontología 101.

Los reptiles vivos -cocodrilos, lagartos, serpientes- carecen de mucho de lo que hace únicas las bocas de los mamíferos. Los dientes de un cocodrilo, por ejemplo, tienen todos una forma similar a la de una hoja; la única diferencia entre ellos es que algunos son grandes y otros pequeños. Los reptiles también carecen de la oclusión precisa -el ajuste entre los dientes superiores e inferiores- que tienen los humanos y otros mamíferos. Además, mientras que nosotros los mamíferos sólo reemplazamos nuestros dientes una vez, los reptiles típicamente reciben visitas del hada de los dientes durante toda su vida, reemplazando sus dientes continuamente a medida que se desgastan y se rompen.

Una parte muy básica de nosotros, nuestra forma de masticar con precisión, emerge en el registro fósil de todo el mundo que va desde 225 millones a 195 millones de años atrás. En la base, en las rocas más antiguas, encontramos un número de reptiles que parecen superficialmente perros. Caminando en cuatro patas, tienen grandes cráneos, y muchos de ellos tienen dientes afilados. Ahí se acaba el parecido. A diferencia de los perros, estos reptiles tienen una mandíbula compuesta de muchos huesos, y sus dientes no encajan bien. Además, sus dientes son reemplazados de una manera decididamente reptil: nuevos dientes entran y salen a lo largo de la vida de los animales.

Sube a las rocas y veremos algo totalmente diferente: la aparición de los mamíferos.

Los huesos de la mandíbula se hacen más pequeños y se mueven hacia el oído. Podemos ver la primera evidencia de que los dientes superiores e inferiores se unen de manera precisa. La forma de la mandíbula también cambia: lo que era una simple vara en los reptiles se parece más a un bumerán en los mamíferos. En este momento, también, los dientes son reemplazados sólo una vez en la vida, como en nosotros. Podemos rastrear todos estos cambios en el registro fósil, especialmente en ciertos sitios de Europa, Sudáfrica y China.

Las rocas de hace unos 200 millones de años contienen criaturas parecidas a los roedores, como *Morganucodon* y *Eozostrodon,* que han empezado a parecerse a los mamíferos. Estos animales, no más grandes que un ratón, tienen piezas importantes de nosotros dentro. Las imágenes no pueden expresar lo maravillosos que son estos

primeros mamíferos. Para mí, fue una verdadera emoción ver criaturas como ellos por primera vez.

Cuando entré en la escuela de postgrado, quería estudiar a los primeros mamíferos.

Elegí Harvard porque Farish A. Jenkins, Jr., a quien conocimos en el primer capítulo, dirigía expediciones al oeste americano que sistemáticamente buscaba en las rocas señales de cómo los mamíferos desarrol aban sus distintas habilidades para masticar.

El trabajo era una verdadera exploración; Farish y su equipo buscaban nuevas localidades y sitios, sin volver a los lugares que otras personas habían descubierto.

Farish había reunido un talentoso grupo de buscadores de fósiles compuesto por personal del Museo de Zoología Comparada de Harvard y algunos mercenarios independientes. Los principales eran Bill Amaral, Chuck Schaff y el difunto Will Downs.

Estas personas fueron mi introducción al mundo de la paleontología.

Farish y el equipo habían estudiado mapas geológicos y fotos aéreas para elegir áreas prometedoras donde podrían encontrar los primeros mamíferos. Luego, cada verano, se subieron a sus camiones y se dirigieron a los desiertos de Wyoming, Arizona y Utah.

Cuando me uní a ellos, en 1983, ya habían encontrado una serie de nuevos e importantes mamíferos y yacimientos fósiles. Me llamó la atención el poder de las predicciones: simplemente leyendo artículos científicos y libros, el equipo de Farish pudo identificar lugares probables e improbables para encontrar los primeros mamíferos.

Mi bautismo en paleontología de campo vino de caminar en el desierto de Arizona con Chuck y Bill. Al principio, toda la empresa parecía totalmente aleatoria. Esperaba algo parecido a una campaña militar, un reconocimiento organizado y coordinado de la zona. Lo que vi parecía el extremo opuesto. El equipo se lanzaría sobre un trozo de roca en particular, y la gente se dispersaría en todas las direcciones imaginables para buscar fragmentos de hueso en la superficie. Durante las primeras semanas de la expedición, me dejaron solo. Salí a buscar fósiles, inspeccionando sistemáticamente cada roca que veía en busca de un trozo de hueso en la superficie. Al final de cada día volvíamos a

casa para mostrar las cosas que encontrábamos. Chuck tendría varias bolsas de huesos. Bill tendría su complemento, normalmente con algún tipo de pequeño cráneo u otro premio. Y yo no tenía nada, mi bolsa vacía un triste recordatorio de lo mucho que tenía que aprender.

Después de unas semanas de esto, decidí que sería una buena idea caminar con Chuck. Parecía tener las bolsas más l enas cada día, así que ¿por qué no seguir las indicaciones del experto? Chuck estaba feliz de caminar conmigo y exponer su larga carrera en el campo de la paleontología. Chuck es todo el oeste de Texas con un florecimiento de Brooklyn: botas de vaquero y valores occidentales con acento

neoyorquino. Mientras me contaba historias de sus expediciones pasadas, me pareció una experiencia totalmente humilde. Primero, Chuck no miró cada roca, y cuando eligió una para mirar, por mi vida no pude entender por qué. Luego estaba el aspecto realmente vergonzoso de todo esto: Chuck y yo mirábamos el mismo terreno. No vi nada más que el suelo del desierto de Rock-Barren. Chuck vio dientes fósiles, mandíbulas e incluso trozos de cráneo.

Una vista aérea habría mostrado a dos personas caminando solas en medio de una llanura aparentemente ilimitada, donde la vista de las polvorientas mesetas de arenisca roja y verde, las colinas y las tierras baldías se extendía por kilómetros. Pero Chuck y yo sólo mirábamos el suelo, los escombros y el talud del suelo del desierto. Los fósiles que buscábamos eran diminutos, no más de unos pocos centímetros de largo, y el nuestro era un mundo muy pequeño. Este entorno íntimo contrastaba enormemente con la inmensidad del panorama del desierto que nos rodeaba. Me sentía como si mi compañero de camino fuera la única persona en todo el planeta, y toda mi existencia se centraba en pedazos de escombros.

Chuck fue extraordinariamente paciente conmigo mientras lo molestaba con preguntas durante la mayor parte de cada día de caminata. Quería que describiera *exactamente* cómo encontrar los huesos. Una y otra vez, me dijo que buscara "algo diferente", algo que tuviera la textura de un hueso y no de una roca, algo que bril ara como los dientes, algo que se pareciera a un hueso del brazo, no a un trozo de arenisca.

Sonaba fácil, pero no podía entender lo que me decía. Por mucho que lo intentara, aún así volvía a casa cada día con las manos vacías. Ahora era aún más vergonzoso, ya que Chuck, que miraba las mismas

piedras, volvía a casa con una bolsa tras otra.

Finalmente, un día, vi mi primer pedazo de diente brillando en el sol del desierto.

Estaba sentado en unos escombros de arenisca, pero allí estaba, tan claro como el día.

El esmalte tenía un brillo que no tenía ninguna otra roca; no se parecía a nada que hubiera visto antes. Bueno, no exactamente, estaba mirando cosas como esta todos los días. La diferencia fue que esta vez finalmente lo vi, vi la distinción entre la roca y el hueso. El diente brillaba, y cuando lo vi bril ar, vi sus cúspides. Todo el diente aislado era del tamaño de una moneda de diez centavos, sin incluir las raíces que sobresalían de su base. Para mí, era tan glorioso como el dinosaurio más grande de las salas de cualquier museo.

De repente, el suelo del desierto explotó con hueso; donde antes sólo había visto roca, ahora veía pequeños trozos de fósiles por todas partes, como si llevara un nuevo par de gafas especiales y un foco brillaba sobre todos los diferentes trozos de hueso. Junto al diente había pequeños fragmentos de otros huesos, y luego más dientes. Estaba mirando una mandíbula que se había desgastado en la superficie y se había fragmentado. Comencé a regresar a casa con mis propias bolsitas cada noche.

Ahora que por fin podía ver los huesos por mí mismo, lo que una vez pareció un esfuerzo de grupo al azar comenzó a parecer decididamente ordenado. La gente no se

dispersaba al azar por el desierto, sino que había reglas reales, aunque no explícitas.

Regla número uno: ir a las rocas de aspecto más productivo, a juzgar por cualquier imagen de búsqueda o pistas visuales que hayas obtenido de la experiencia anterior.

Regla número dos: no sigas los pasos de nadie; cubre un nuevo terreno (Chuck me había dejado amablemente romper esta). Regla tres: si tu área de ciruela ya tiene a alguien en ella, encuentra una nueva ciruela, o busca un sitio menos prometedor. El primero que llega, es el primero que se sirve.

Con el tiempo, empecé a aprender las señales visuales de otros tipos de huesos: huesos largos, mandíbulas y partes del cráneo. Una vez que ves estas cosas nunca pierdes la capacidad de encontrarlas. Así como un gran pescador puede leer el agua y ver los peces que hay dentro, un buscador de fósiles utiliza un catálogo de imágenes de búsqueda que hacen que los fósiles parezcan saltar de las rocas. Estaba empezando a obtener mis propias impresiones visuales de cómo se ven los huesos fósiles en diferentes rocas y en diferentes condiciones de iluminación. Encontrar fósiles en el sol de la mañana es muy diferente a encontrarlos en la tarde, debido a la forma en que la luz juega a lo largo del suelo.

Veinte años después, sé que debo pasar por una experiencia similar cada vez que busco fósiles en algún lugar nuevo, desde el Triásico de Marruecos hasta el Devónico de la Isla de Ellesmere. Lucharé los primeros días, casi como lo hice con Chuck en Arizona hace veinte años. La diferencia es que ahora tengo algo de confianza en que una imagen de búsqueda se activará eventualmente.

El objetivo de la prospección que hice con Chuck era encontrar un sitio con suficientes huesos para marcar una capa rica en fósiles que pudiéramos exponer. Para cuando me uní al equipo, el equipo de Farish ya había descubierto una zona así, un pedazo de roca de unos cien pies de largo que contenía esqueleto tras esqueleto de pequeños animales.

La cantera de fósiles de Farish estaba en una piedra de barro de grano muy fino. El truco de trabajar en ella era darse cuenta de que los fósiles provenían de una fina capa, de no más de un milímetro de espesor. Una vez que se expuso esa superficie, se tenía una muy buena oportunidad de ver los huesos. Eran diminutos, de no más de una o dos pulgadas de largo, y negros, por lo que parecían casi como manchas negras contra la roca marrón. Los pequeños animales que encontramos incluían ranas (algunas de las primeras), anfibios sin patas, lagartos y otros reptiles, y, lo que es más importante, algunos de los primeros mamíferos.

El punto clave es que los primeros mamíferos eran pequeños. Muy pequeños. Sus dientes no tenían mucho más de 2 milímetros de largo. Para verlos, había que tener mucho cuidado y, más a menudo, mucha suerte. Si el diente estaba cubierto por una miga de roca o incluso por unos pocos granos de arena, puede que nunca lo veas.

Fue la visión de estos primeros mamíferos lo que me enganchó. Expuse la capa fósil, y luego escaneé toda la superficie a través de mi lente manual de 10 aumentos.

Escudriñaría todo en mis manos y rodillas, con mi ojo y lente de mano a sólo dos pulgadas de la superficie del suelo. Así absorto, a menudo olvidaba dónde estaba y accidentalmente invadía el lugar de mi vecino sólo para que me tiraran una bolsa de tierra en la cabeza como un recordatorio agudo para mantenerme en mi espacio.

Ocasionalmente, sin embargo, me sacaba la lotería y veía una profunda conexión por primera vez. Los dientes se veían como pequeñas cuchil as, con cúspides y raíces. Las cúspides de esos pequeños dientes revelaban algo muy especial. Cada diente tenía un patrón característico de desgaste en la cara donde los dientes superiores e inferiores encajan. Estaba viendo algunas de las primeras evidencias de nuestro patrón de masticación precisa, sólo en un pequeño mamífero de 190 millones de años.

El poder de esos momentos fue algo que nunca olvidaré. Aquí, rompiendo rocas en la tierra, estaba descubriendo objetos que podrían cambiar la forma de pensar de la gente.

Esa yuxtaposición entre las actividades más infantiles, incluso humillantes, y una de las grandes aspiraciones intelectuales humanas nunca se me ha escapado. Trato de recordarlo cada vez que excavo en un lugar nuevo.

Al volver a la escuela ese otoño, desarrollé el bicho de la expedición a lo grande.

Quería dirigir mi propia expedición pero no tenía los recursos para hacer algo grande, así que me puse a explorar rocas en Connecticut que tenían unos 200 millones de años.

Bien estudiadas durante el siglo XIX, habían sido el escenario de un número de importantes descubrimientos de fósiles. Me imaginé que si golpeaba esas mismas rocas con el lente de mi mano y mi maravillosa y exitosa imagen de búsqueda de mamíferos, encontraría muchas cosas buenas. Alquilé una camioneta, tomé una caja de bolsas de recolección y me puse en marcha.

Otra lección aprendida: No encontré nada. Volvamos a la mesa de dibujo, o más precisamente, a la biblioteca de geología de la escuela.

Necesitaba un lugar donde las rocas de 200 millones de años estuvieran bien expuestas: en Connecticut sólo había cortes de carretera. El lugar ideal sería a lo largo de la costa, donde la acción de las olas proporcionaría mucha superficie de roca recién cortada para mirar. Mirar un mapa hizo que mi elección fuera clara: en Nueva Escocia, las rocas del Triásico y del Jurásico (de unos 200 millones de años de antigüedad) se encontraban a lo largo de la superficie. Para colmo, la literatura turística sobre la zona anunciaba las mareas más altas del mundo, ocasionalmente de más de cincuenta pies.

No podía creer mi suerte.

Llamé al experto en estas rocas, Paul Olsen, que acababa de empezar a enseñar en la Universidad de Columbia. Si estaba entusiasmado con las perspectivas de encontrar fósiles antes de hablar con Paul, estaba echando espuma después. Describió la geología perfecta para encontrar pequeños mamíferos o reptiles: antiguos arroyos y dunas que tenían las propiedades adecuadas para preservar pequeños huesos. Mejor aún, ya había encontrado algunos huesos de dinosaurio y huellas de pisadas a lo largo de un tramo de playa cerca de la ciudad de Parrsboro, Nueva Escocia. Paul y yo ideamos un plan para

visitar Parrsboro juntos y buscar en la playa pequeños fósiles. Esto fue maravillosamente generoso por parte de Paul porque tenía derechos sobre la zona y no tenía la responsabilidad de ayudarme, y mucho menos de colaborar.

Consulté con Farish sobre mis planes emergentes, y no sólo me ofreció dinero, sino que me sugirió que llevara a los expertos en búsqueda de fósiles, Bill y Chuck. Dinero, Bill, Chuck, Paul Olsen, excelentes rocas y exposiciones decentes, ¿qué más podrías querer? El verano siguiente, dirigí mi primera expedición de fósiles.

Me fui en una camioneta alquilada a las playas de Nueva Escocia con mi equipo de campo, Bill y Chuck. La broma, por supuesto, era para mí. Con Bill y Chuck, que entre los dos tenían más años de experiencia en el campo que yo en los cumpleaños, yo era el líder sólo de nombre. Ellos se encargaban de buscar fósiles, mientras yo pagaba las facturas de la cena.

Las rocas de Nueva Escocia estaban expuestas en acantilados de arenisca anaranjada absolutamente magníficos a lo largo de la Bahía de Fundy. Las mareas entraban y salían alrededor de media milla cada día, exponiendo enormes pisos de lecho de roca anaranjada. No pasó mucho tiempo antes de que empezáramos a encontrar huesos en muchas áreas diferentes. Pequeñas manchas blancas de hueso salían a lo largo de los acantilados. Paul encontraba huellas por todas partes, incluso en los pisos abiertos por las mareas en movimiento cada día.

Paul Olsen encontrando huellas en las marismas de Nueva Escocia. Con la marea alta, el agua llegaba hasta los acantilados de la izquierda. La punta de la flecha apunta a un punto donde, si programamos mal nuestro viaje, estaríamos atascados en los acantilados durante horas. Fotografía del autor.

Chuck, Bill, Paul y yo pasamos dos semanas cavando en Nueva Escocia, encontrando trozos, escamas y fragmentos de huesos que sobresalían de las rocas. Bill, siendo el preparador de fósiles del grupo, me advirtió continuamente que no expusiera gran parte de los huesos en el campo, sino que los envolviera todavía cubiertos de arenisca para poder rastrear los huesos en el laboratorio bajo un microscopio en condiciones más controladas. Lo hicimos, pero admito que estoy decepcionado con lo que trajimos a casa: sólo unas cuantas cajas de zapatos de rocas, con pequeñas astillas y escamas de huesos que se ven. Mientras conducíamos a casa, recuerdo haber pensado que aunque no habíamos encontrado mucho, había sido una gran experiencia. Luego me tomé una semana de vacaciones; Chuck y Bill volvieron al laboratorio.

Cuando regresé a Boston, Chuck y Bill salieron a almorzar. Algunos colegas estaban visitando el museo y, al verme, se acercaron a darme la mano, a felicitarme y a darme una palmada en la espalda. Me trataban como a un héroe conquistador, pero no tenía ni idea de por qué; parecía una broma extraña, como si me estuvieran preparando una gran estafa. Me dijeron que fuera al laboratorio de Bill para ver mi trofeo. Sin saber qué pensar, corrí.

Bajo el microscopio de Bill había una mandíbula diminuta, de no más de media pulgada de largo. En ella había unos pocos dientes diminutos. El dueño de la mandíbula era claramente un reptil, porque los dientes tenían una sola raíz en la base, mientras que los dientes de los mamíferos tienen muchos. Pero en los dientes había pequeños bultos y crestas que podía ver incluso a simple vista. Mirar los dientes bajo el microscopio me dio la mayor sorpresa: las cúspides tenían pequeños parches de desgaste. Este era un reptil con oclusión entre dientes. Mi fósil era parte mamífero, parte reptil.

Sin saberlo yo, Bill había desenvuelto uno de nuestros bloques de roca, vio una mota de hueso y lo preparó con una aguja bajo el microscopio. Ninguno de nosotros lo había conocido en el campo, pero nuestra expedición fue un gran éxito. Todo gracias a Bill.

¿Qué aprendí ese verano? Primero, aprendí a escuchar a Chuck y Bill. Segundo, aprendí que muchos de los grandes descubrimientos ocurren en las manos de los preparadores de fósiles, no en el campo. Resultó que mis mayores lecciones sobre el trabajo de campo estaban por venir.

El reptil que Bill había encontrado era un tritelado, una criatura conocida de Sudáfrica y ahora de Nueva Escocia. Estos eran muy raros, así que queríamos volver a Nueva Escocia el próximo verano para encontrar más. Pasé todo el invierno tenso con la anticipación. Si hubiera podido atravesar el hielo del invierno para encontrar fósiles, lo habría hecho.

En el verano de 1985, volvimos al lugar donde habíamos encontrado el triteledón. El lecho fósil estaba justo al nivel de la playa, donde un pequeño trozo del acantilado se había caído varios años antes. Tuvimos que programar nuestra visita diaria de la misma manera: el sitio era inaccesible con la marea alta porque el agua subía demasiado

alto alrededor de un punto en el que teníamos que navegar. Nunca olvidaré ese primer día de emoción cuando rodeamos el punto para encontrar nuestro pequeño trozo de roca naranja brillante. La experiencia fue memorable por lo que faltaba: la mayor parte del área que habíamos trabajado el año anterior. Se había desgastado el invierno anterior.

Nuestro encantador sitio fósil, que contiene hermosos triteledones, desapareció con las mareas.

La buena noticia, si se puede llamar así, es que había un poco más de arenisca naranja para escanear a lo largo de la playa. La mayor parte de la playa, en particular el punto que teníamos que recorrer cada mañana, estaba compuesta de basalto de un flujo de lava de 200 millones de años. Estábamos seguros de que no se podían encontrar fósiles allí, ya que es virtualmente axiomático que estas rocas, que una vez fueron súper calientes, nunca preservarán los huesos fósiles. Pasamos cinco o más días cronometrando nuestras visitas a los sitios por las mareas, observando las areniscas anaranjadas que había más allá, y no encontramos absolutamente nada.

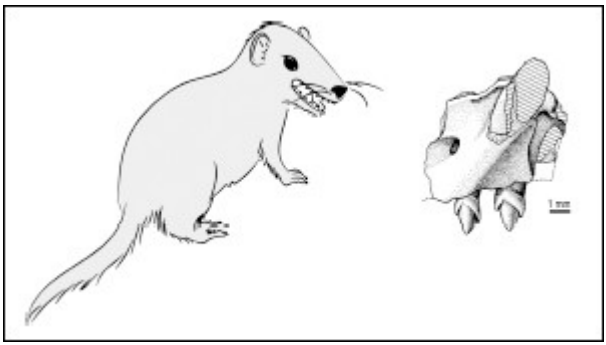
Nuestro avance llegó cuando el presidente del Club de Leones local pasó por nuestra cabaña una noche buscando jueces para el concurso de belleza local, para coronar la Semana de Miss Hogar Antiguo de Parrsboro. El pueblo siempre confió en los visitantes para esta onerosa tarea, porque las pasiones internas típicamente son altas durante el evento. Los jueces habituales, una pareja de ancianos de Quebec, no visitaron este año, y la tripulación y yo fuimos invitados a sustituirlos.

Pero al juzgar el concurso de belleza y discutir su conclusión, nos quedamos despiertos hasta muy tarde, nos olvidamos de las mareas de la mañana siguiente y terminamos atrapados en una curva en los acantilados de basalto. Durante unas dos horas, estuvimos atascados en un pequeño promontorio de unos cincuenta pies de ancho. La roca era volcánica y no del tipo que uno elegiría para buscar fósiles. Saltamos las piedras hasta aburrirnos, luego miramos las rocas: tal vez encontraríamos cristales o minerales interesantes. Bill desapareció a la vuelta de una esquina, y yo miré algo del basalto que había detrás de nosotros. Después de unos quince minutos escuché mi nombre. Nunca olvidaré el tono discreto de Bill: "Uh, Neil, tal vez quieras venir aquí." Al doblar la esquina, vi la emoción en los ojos de Bill. Luego vi las rocas a sus pies. De las rocas sobresalían pequeños fragmentos

blancos. Huesos fósiles, miles de ellos.

Esto era exactamente lo que estábamos buscando, un sitio con huesos pequeños.

Resultó que las rocas volcánicas no eran totalmente volcánicas: trozos de arenisca cortados a través del acantilado. Las rocas habían sido producidas por un antiguo flujo de lodo asociado a una erupción volcánica. Los fósiles estaban atascados en los antiguos lodos.



Trajimos toneladas de estas rocas a casa. Dentro había más triteledones, algunos cocodrilos primitivos, y otros reptiles parecidos a lagartos. Los triteledones eran las gemas, por supuesto, porque mostraban que algunos tipos de reptiles ya mostraban nuestro tipo de masticación de mamíferos.

Los primeros mamíferos, como los que el equipo de Farish descubrió en Arizona, tenían patrones de mordedura muy precisos. Los rasguños en las cúspides de un diente superior encajaban en las imágenes de espejo de estos rasguños en un diente inferior.

Estos patrones de desgaste son tan finos que las diferentes especies de mamíferos tempranos pueden distinguirse por sus patrones de desgaste y oclusión de los dientes.

Los mamíferos de Farish's Arizona tienen un patrón diferente de cúspides y masticación que los de la misma edad de América del Sur, Europa o China. Si sólo tuviéramos que comparar estos fósiles con los de reptiles vivos, entonces el origen de la alimentación de los mamíferos parecería ser un gran misterio. Como he mencionado, los cocodrilos y los lagartos no tienen ningún tipo de patrón de oclusión. Aquí es donde entran las criaturas como los triteledones. Cuando retrocedemos en el tiempo, a rocas unos 10

millones de años más antiguas, como las de Nueva Escocia, encontramos triteledones con una versión incipiente de esta forma de masticar. En los triteledones, las cúspides individuales no se entrelazan de manera precisa, como lo hacen en los mamíferos, sino que toda la superficie interna del diente superior se cizalla contra la superficie externa del diente inferior, casi como una tijera. Por supuesto, estos cambios en la oclusión no ocurrieron en el vacío. No debería sorprender que las primeras criaturas que mostraron un tipo de masticación de mamíferos también muestran rasgos de mamíferos en la mandíbula inferior, el cráneo y el esqueleto.

Un triteledón y un trozo de su mandíbula superior descubiertos en Nueva Escocia.

Fragmento de mandíbula ilustrado por Lazlo Meszoley.

Debido a que los dientes se conservan tan bien en el registro fósil, tenemos información muy detallada acerca de cómo los principales patrones de masticación - y la capacidad de utilizar nuevas dietas - se van desarrol ando con el tiempo. Gran parte de la historia de los mamíferos es la historia de las nuevas formas de procesar los alimentos. Poco después de encontrar triteledones en el registro fósil, empezamos a ver todo tipo de nuevas especies de mamíferos con nuevos tipos de dientes, así como nuevas formas de ocluirlos y utilizarlos. Hace unos 150 millones de años, en rocas de todo el mundo, encontramos pequeños mamíferos del tamaño de roedores con un nuevo tipo de fila de dientes, que allanó el camino para nuestra propia existencia. Lo que hizo a estas criaturas especiales fue la complejidad de sus bocas: la mandíbula tenía

---

diferentes tipos de dientes. La boca desarrolló una especie de división del trabajo. Los incisivos en la parte delantera se especializaron en cortar comida, los caninos más atrás para perforarla, y los molares en el extremo posterior para cortarla o triturarla. Estos pequeños mamíferos, que se asemejan a los ratones, tienen una pieza fundamental de nuestra historia dentro de ellos. Si dudan de esto, imaginen comer una manzana sin dientes incisivos o, mejor aún, una zanahoria grande sin muelas. Nuestra dieta diversa, que va desde la fruta a la carne y al Twinkie, sólo es posible porque nuestros lejanos antepasados mamíferos desarrollaron una boca con diferentes tipos de dientes que pueden ocluirse con precisión. Y sí, las etapas iniciales de

esto se ven en los triteledones y otros parientes antiguos: los dientes del frente tienen un patrón diferente de hojas y cúspides que los de atrás.

LOS DIENTES Y LOS HUESOS, LAS COSAS DURAS

Casi no hace falta decir que lo que hace a los dientes especiales entre los órganos es su dureza. Los dientes tienen que ser más duros que los trozos de comida que descomponen; imagínese tratando de cortar un filete con una esponja. En muchos sentidos, los dientes son tan duros como las rocas, y la razón es que contienen una molécula de cristal en su interior. Esa molécula, conocida como hidroxiapatita, impregna la infraestructura molecular y celular tanto de los dientes como de los huesos, haciéndolos resistentes a la flexión, compresión y otras tensiones. Los dientes son extra duros porque su capa externa, el esmalte, es mucho más rica en hidroxiapatita que cualquier otra estructura del cuerpo, incluyendo el hueso. El esmalte da a los dientes su brillo blanco. Por supuesto, el esmalte es sólo una de las capas que componen nuestros dientes. Las capas internas, como la pulpa y la dentina, también están l enas de hidroxiapatita.

Hay muchas criaturas con tejidos duros, almejas y langostas, por ejemplo. Pero no usan hidroxiapatita; las langostas y almejas usan otros materiales, como carbonato de calcio o quitina. Además, a diferencia de nosotros, estos animales tienen un exoesqueleto que cubre el cuerpo. Nuestra dureza está en el interior.

Nuestra particular dureza, con dientes dentro de la boca y huesos dentro del cuerpo, es una parte esencial de lo que somos. Podemos comer, movernos, respirar, incluso metabolizar ciertos minerales debido a nuestros tejidos que contienen hidroxiapatita.

Por estas capacidades, podemos agradecer al ancestro común que compartimos con todos los peces. Todos los peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos del planeta son como nosotros. Todos ellos tienen estructuras que contienen hidroxiapatita. ¿Pero de dónde vino todo esto?

Hay una importante cuestión intelectual en juego. Sabiendo dónde, cuándo y cuán duros son los huesos y los dientes, estaremos en posición de entender por qué. ¿Por qué surgieron nuestro tipo de

tejidos duros? ¿Surgieron para proteger a los animales de su entorno? ¿Vinieron para ayudarlos a moverse? Las respuestas a estas preguntas se encuentran en el registro fósil, en rocas de aproximadamente 500 millones de años de antigüedad.

Algunos de los fósiles más comunes en los océanos antiguos, de 500 a 250 millones de años de antigüedad, son conodones. Los conodontes fueron descubiertos en la década de 1830 por el biólogo ruso Christian Pander, que reaparecerá en unos pocos capítulos. Son pequeños organismos con forma de concha con una serie de púas que sobresalen de ellos. Desde la época de Pander, los conodontes han sido descubiertos en todos los continentes; hay lugares en los que no se puede romper una roca sin encontrar un gran número de ellos. Se conocen cientos de tipos de conodontes.

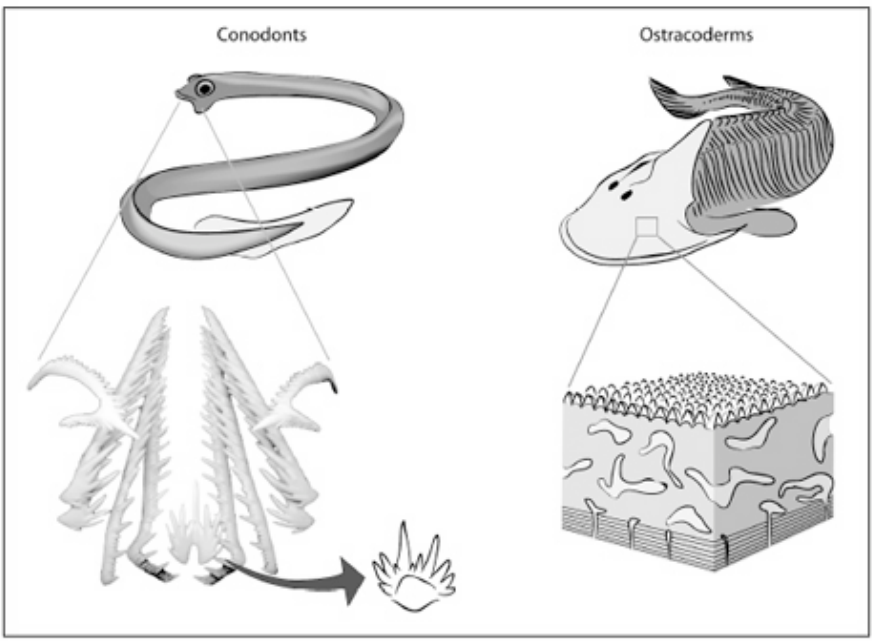
Durante mucho tiempo, los conodones fueron enigmas: los científicos no estaban de acuerdo sobre si eran animales, vegetales o minerales. Todo el mundo parecía tener una teoría de mascotas. Se afirmaba que los conodones eran trozos de almejas, esponjas, vertebrados, incluso gusanos. La especulación terminó cuando animales enteros comenzaron a aparecer en el registro fósil.

El primer espécimen que le dio sentido a todo fue encontrado por un profesor de paleontología hurgando en el sótano de la Universidad de Edimburgo: había una losa de roca con lo que parecía una lamprea en ella. Tal vez recuerden las lampreas de la clase de biología. Son peces muy primitivos que no tienen mandíbulas. Se ganan la vida uniéndose a otros peces y alimentándose de sus fluidos corporales. Incrustados en la parte delantera de la impresión de la lamprea había pequeños fósiles que parecían extrañamente familiares. Conodontes. Otros fósiles similares a los de las lampreas comenzaron a salir de las rocas en Sudáfrica y más tarde en el oeste de los Estados Unidos. Todas estas criaturas tenían un rasgo excepcional: tenían conjuntos enteros de conodontes en sus bocas. La conclusión fue muy clara: los conodones eran dientes. Y no cualquier diente. Los conodones eran los dientes de un antiguo pez sin mandíbula.

Tuvimos los primeros dientes en el registro fósil durante más de 150 años antes de que nos diéramos cuenta de lo que eran. La razón se reduce a cómo se preservan los fósiles. Los trozos duros, por ejemplo los dientes, tienden a preservarse fácilmente. Las partes blandas, como el músculo, la piel y las tripas, normalmente se descomponen sin

fosilizarse. Tenemos gabinetes de museo llenos de esqueletos fósiles, conchas y dientes, pero muy pocas tripas y cerebros. En las raras ocasiones en las que encontramos evidencia de tejidos blandos, normalmente se conservan sólo como impresiones o moldes. Nuestro registro fósil está cargado de dientes de conodonte, pero nos llevó 150

años encontrar los cuerpos. Hay algo más notable acerca de los cuerpos a los que pertenecían los conodontes. No tienen huesos duros. Eran animales de cuerpo blando con dientes duros.



Durante años, los paleontólogos han discutido acerca de por qué los esqueletos duros, los que contienen hidroxiapatita, surgieron en primer lugar. Para aquellos que creían que los esqueletos comenzaron con mandíbulas, espinas dorsales o armaduras corporales, los conodones proporcionan un "diente inconveniente", si se quiere. Las primeras partes del cuerpo que contenían hidroxiapatita dura fueron los dientes. Los huesos duros surgieron no para proteger a los animales, sino para comerlos. Con esto, el mundo de los peces que se comen a los peces comenzó realmente en serio. Primero, los peces grandes se comieron a los pequeños; luego, comenzó una carrera armamentista. Los peces pequeños desarrollaron armaduras, los grandes obtuvieron mandíbulas más grandes para romper las armaduras, y así sucesivamente. Los dientes y los huesos realmente cambiaron el panorama competitivo.

Las cosas se ponen aún más interesantes cuando vemos algunos de los primeros animales con cabezas huesudas. A medida que avanzamos en el tiempo desde los primeros animales conodontales, vemos cómo eran los primeros esqueletos con cabezas óseas. Pertenecían a unos peces l amados ostracodermos, tienen alrededor de 500 millones de años, y se encuentran en las rocas de todo el mundo, desde el Ártico hasta Bolivia. Estos peces parecen hamburguesas con colas carnosas.

La región de la cabeza de un ostracodromo es un gran disco cubierto por un escudo de hueso, que parece una armadura. Si abriera un cajón del museo y le mostrara uno, inmediatamente notaría algo extraño: el esqueleto de la cabeza es realmente bril ante, muy parecido a nuestros dientes o a las escamas de un pez.

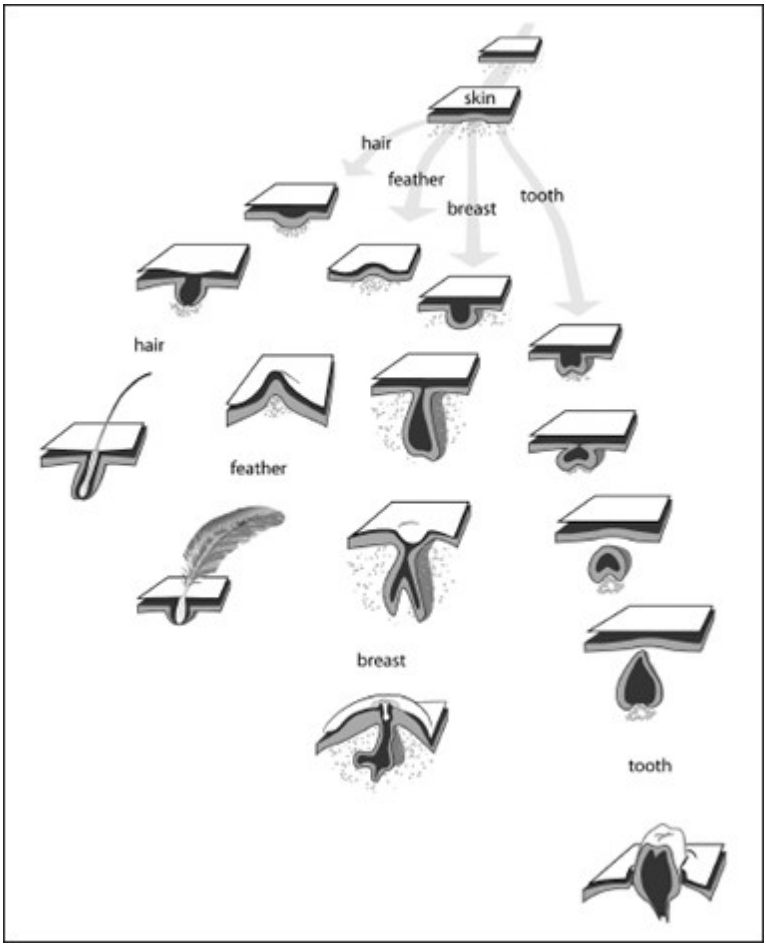
Un conodont (izquierda) y un ostracoderm (derecha). Los conodones se encontraron originalmente aislados. Luego, a medida que se conocieron animales enteros, aprendimos que muchos de ellos funcionaban juntos como una hilera de dientes en las bocas de estos peces de cuerpo blando sin mandíbula. Los ostracodermos tienen la cabeza cubierta con un escudo óseo. Las capas microscópicas de ese escudo parecen estar compuestas de pequeñas estructuras similares a dientes. Reconstrucción de la fila de dientes de Conodont cortesía del Dr. Mark Purnell, de la Universidad de Leicester, y del Dr. Philip Donoghue, de la Universidad de Bristol.

Una de las alegrías de ser un científico es que el mundo natural tiene el poder de asombrar y sorprender. Aquí, en los ostracodermos, un oscuro grupo de antiguos peces sin mandíbula, es un ejemplo perfecto. Los ostracodermos están entre las primeras criaturas con cabezas huesudas. Cortar el hueso del cráneo, incrustarlo en plástico, ponerlo bajo el microscopio, y no se encuentra cualquier estructura de tejido antiguo, sino que se encuentra virtualmente la misma estructura que en nuestros dientes. Hay una capa de esmalte e incluso una capa de pulpa. Todo el escudo está formado por miles de pequeños dientes fusionados. Este cráneo óseo, uno de los primeros en el registro fósil, está hecho completamente de pequeños dientes. Los dientes originalmente surgieron para morder a las criaturas; más tarde, una versión de los dientes se utilizó de una nueva manera para protegerlos.

DIENTES, GLÁNDULAS Y PLUMAS

Los dientes no sólo anuncian una nueva forma de vida, sino que revelan el origen de una nueva forma de hacer órganos. Los dientes se desarrollan por una interacción de dos capas de tejido en nuestra piel en desarrollo. Básicamente, dos capas se acercan entre sí, las células se dividen, y las capas cambian de forma y hacen proteínas. La capa externa escupe los precursores moleculares del esmalte, la capa interna la dentina y la pulpa del interior del diente. Con el tiempo, la estructura del diente se establece, y luego se ajusta para hacer los patrones de las cúspides y de los canales que distinguen a cada especie.

La clave para el desarrollo de los dientes es que una interacción entre estas dos capas de tejido, una lámina externa de células y una capa interna de células sueltas, hace que el tejido se pliegue y hace que ambas capas secreten las moléculas que construyen el órgano. Resulta que exactamente el mismo proceso subyace en el desarrol o de todas las estructuras que se desarrol an dentro de la piel: escamas, pelo, plumas, glándulas sudoríparas, incluso glándulas mamarias. En cada caso, dos capas se unen, se pliegan y secretan proteínas. De hecho, las baterías de los principales interruptores genéticos que están activos en este proceso en cada tipo de tejido son muy similares.



Los dientes, los pechos, las plumas y el pelo se desarrol an a partir de las interacciones entre las capas de la piel.

Este ejemplo es similar a la fabricación de una nueva fábrica o proceso de ensamblaje.

Una vez que se inventó la inyección de plástico, se usó para fabricar todo, desde piezas de automóviles hasta yoyos. Los dientes no son diferentes. Una vez que el proceso que hace los dientes se hizo realidad, se modificó para hacer los diversos tipos de órganos que se encuentran dentro de la piel. Vimos esto l evado a un extremo muy grande en los ostracodernos. Las aves, los reptiles y los humanos son igual de extremos en muchos sentidos. Nunca tendríamos escamas, plumas o pechos si no tuviéramos dientes en primer lugar. Las

herramientas de desarrollo que hacen los dientes han sido reutilizadas para hacer otras estructuras importantes de la piel. En un sentido muy real, órganos tan diferentes como los dientes, las plumas y los pechos están inextricablemente unidos por la historia.

Un tema de estos cuatro primeros capítulos es cómo podemos rastrear el mismo órgano en diferentes criaturas. En el capítulo 1 vimos que podemos hacer predicciones y encontrar versiones de nuestros órganos en rocas antiguas. En el capítulo 2 vimos cómo podemos rastrear huesos similares desde los peces hasta los humanos. El capítulo 3 muestra cómo la parte hereditaria real de nuestros cuerpos, el ADN y la receta genética que construye los órganos, puede seguirse en criaturas muy diferentes. Aquí, en los dientes, las glándulas mamarias y las plumas, encontramos un tema similar. Los procesos biológicos que hacen estos diferentes órganos son versiones de la misma cosa.

Cuando se ven estas profundas similitudes entre los diferentes órganos y cuerpos, se empieza a reconocer que los diversos habitantes de nuestro mundo son sólo variaciones de un tema.

CAPÍTULO CINCO

AVANZANDO

Fue dos noches antes de mi final de anatomía y estuve en el laboratorio alrededor de las dos de la mañana, memorizando los nervios craneales. Hay doce nervios craneales, cada uno de los cuales se ramifica para dar extraños giros y vueltas por el interior del cráneo. Para estudiarlos, dividimos el cráneo desde la frente hasta la barbil a y aserramos algunos huesos de la mejil a. Así que ahí estaba yo, sosteniendo la mitad de la cabeza en cada mano, trazando los caminos retorcidos que los nervios toman desde nuestro cerebro hasta los diferentes músculos y órganos sensoriales del interior.

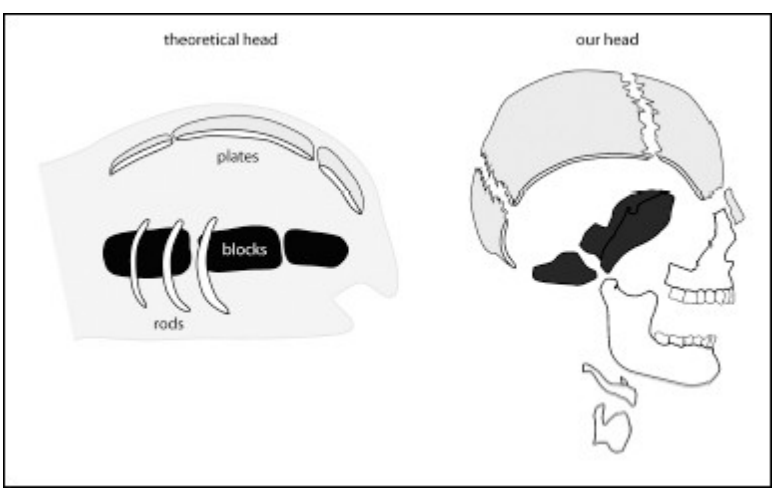
Me embelesaron dos de los nervios craneales, el trigémino y el facial. Su complicado patrón se redujo a algo tan simple, tan escandalosamente fácil que vi la cabeza humana de una nueva

manera. Esa visión vino de la comprensión de la situación mucho más simple de los tiburones. La elegancia de mi realización -aunque no su novedad; los anatomistas comparativos la habían tenido hace un siglo o más- y la presión del próximo examen me hizo olvidar dónde estaba. En algún momento, miré a mi alrededor.

Era la mitad de la noche y estaba solo en el laboratorio. También estaba rodeado por los cuerpos de 25 seres humanos bajo sábanas. Por primera y última vez, me dio escalofríos. Me hice tanta espuma que los pelos de mi nuca se levantaron, mis pies hicieron su trabajo, y en un nanosegundo me encontré en la parada del autobús, sin aliento. No hace falta decir que me sentí ridículo. Recuerdo haberme dicho a mí mismo: Shubin, te has vuelto dura. Ese pensamiento no duró mucho tiempo; pronto descubrí que había dejado las l aves de mi casa en el laboratorio.

Lo que me hizo tan duro es que la anatomía de la cabeza es profundamente hipnotizante, de hecho, hermosa. Una de las alegrías de la ciencia es que, en ocasiones, vemos un patrón que revela el orden en lo que inicialmente parece caótico. Un desorden se convierte en parte de un plan simple, y sientes que estás viendo a través de algo para encontrar su esencia. Este capítulo trata de ver esa esencia dentro de nuestras propias cabezas. Y, por supuesto, las cabezas de los peces.

EL CAOS INTERIOR DE LA CABEZA



La anatomía de la cabeza no sólo es complicada sino también difícil de ver, ya que, a diferencia de otras partes del cuerpo, los tejidos de la

cabeza están encapsulados en una caja ósea. Literalmente tenemos que ver a través de la mejilla, la frente y el cráneo para ver los vasos y los órganos. Habiendo abierto así una cabeza humana, encontramos un grupo de lo que parecen ser líneas de pesca enredadas. Los vasos y los nervios hacen curiosos bucles y giros a medida que viajan a través del cráneo. Miles de ramas nerviosas, músculos y huesos se encuentran dentro de esta pequeña caja. A primera vista, todo el conjunto es un desorden desconcertante.

Nuestros cráneos están hechos de tres partes fundamentales: placas de pensamiento, bloques y barras. Las placas cubren nuestro cerebro. Da una palmadita en la parte superior de tu cabeza y las sentirás. Estas grandes placas encajan entre sí como piezas de rompecabezas y forman gran parte de nuestro cráneo. Cuando nacimos, las placas estaban separadas; los espacios abiertos entre ellas, las fontanelas, son visibles en los bebés, ocasionalmente palpitando con el tejido cerebral debajo. A medida que crecemos, los huesos se agrandan, y para cuando alcanzamos la edad de dos años se han fusionado.

Otra parte de nuestro cráneo está debajo del cerebro, formando una plataforma que lo sostiene. A diferencia de los huesos en forma de placa en la parte superior, estos huesos parecen bloques complicados y tienen muchas arterias y nervios que los atraviesan. El tercer tipo de hueso conforma nuestras mandíbulas, algunos huesos en los oídos y otros en la garganta; estos huesos comienzan a desarrol arse pareciendo barras, que finalmente se rompen y cambian de forma para ayudarnos a masticar, tragar y oír.

Dentro del cráneo hay una serie de compartimentos y espacios que albergan diferentes órganos. Obviamente, el cerebro ocupa el más grande de ellos. Otros espacios contienen nuestros ojos, partes de nuestros oídos y nuestras estructuras nasales. Gran parte del desafío para entender la anatomía de la cabeza proviene de ver estos diferentes espacios y órganos en tres dimensiones.

A los huesos y órganos de la cabeza están unidos los músculos que usamos para morder, hablar y mover los ojos y toda la cabeza. Doce nervios suministran estos músculos, cada uno de los cuales sale del cerebro para viajar a una región diferente dentro de nuestra cabeza. Estos son los temidos nervios craneales.

Placas, bloques y barras: el tema de las calaveras. Cada hueso de nuestra cabeza puede ser rastreado a una de estas cosas.

La clave para desbloquear lo básico de la cabeza es ver los nervios craneales como algo más que un desorden. De hecho, la mayoría de ellos son realmente simples. Los nervios craneales más simples tienen una sola función, y se unen a un músculo u órgano.

El nervio craneal que va a nuestras estructuras nasales, el olfativo, tiene un trabajo: llevar información de nuestros tejidos nasales al cerebro. Algunos de los nervios que van a nuestros ojos y oídos también son simples de esta manera: el nervio óptico está involucrado en la visión; el nervio acústico trabaja en la audición. Otros cuatro nervios craneales sólo sirven para los músculos, trabajando para mover los ojos dentro de las órbitas, por ejemplo, o para mover la cabeza alrededor del cuello.

Pero cuatro de los nervios craneales han dado ataques a los estudiantes de medicina durante décadas. Por una buena razón: los cuatro tienen funciones muy complejas y toman caminos tortuosos a través de la cabeza para hacer su trabajo. El nervio trigémino y el nervio facial merecen una mención especial. Ambos salen del cerebro y se dividen en una desconcertante red de ramas. De forma muy parecida a un cable que puede transportar información de televisión, Internet y voz, una sola rama del nervio trigémino o facial puede transportar información tanto sobre la sensación como sobre la acción. Las fibras individuales para la sensación y la acción emanan de diferentes partes del cerebro, se consolidan en cables (lo que terminamos llamando nervios trigémino y facial), y luego se rompen de nuevo, enviando ramas por toda la cabeza.

Las ramas del trigémino hacen dos cosas principales: controlan los músculos, y llevan la información sensorial de gran parte de nuestra cara al cerebro. Los músculos controlados por el nervio trigémino incluyen los que usamos para masticar, así como pequeños músculos en lo profundo del oído. El trigémino es también el mayor nervio para la sensación en la cara. La razón por la que una bofetada en la cara duele tanto, más allá del dolor emocional, es porque el trigémino lleva la información sensorial de la piel de nuestra cara al cerebro. Su dentista también conoce bien las ramas del nervio trigémino. Diferentes ramas van a las raíces de nuestros dientes; un solo pinchazo de anestésico a lo largo de una de estas ramas puede amortiguar la

sensación de diferentes partes de nuestra fila de dientes.

El nervio facial también controla los músculos y transmite información sensorial.

Como su nombre indica, es el nervio principal que controla los músculos de la expresión facial. Usamos estos pequeños músculos para sonreír, fruncir el ceño, levantar y bajar las cejas, abrir las fosas nasales, etc. Tienen nombres maravil osamente evocadores.

Uno de los principales músculos que usamos para fruncir el ceño, que mueve las esquinas de nuestra boca hacia abajo, se llama depresor anguli oris. Otro gran nombre pertenece al músculo que usamos para fruncir el ceño con preocupación: el corrugador supercilli. Si se abren los orificios nasales, se están usando los nasalis. Cada uno de estos músculos, como cualquier otro músculo de la expresión facial, está controlado por ramas del nervio facial. Cosas como una sonrisa desigual o párpados asimétricamente

---

caídos son una señal de que algo puede estar mal con el nervio facial de un lado de la cara de una persona.

Probablemente empieces a ver por qué me quedé despierto hasta tan tarde para estudiar estos nervios. Nada de ellos parece tener sentido. Por ejemplo, tanto el trigémino como los nervios faciales envían pequeñas ramas a los músculos dentro de nuestros oídos. ¿Por qué dos nervios diferentes, que inervan partes completamente diferentes de la cara y la mandíbula, envían ramas a los músculos de los oídos que se encuentran adyacentes? Aún más confuso, el trigémino y la cara casi se entrecruzan al enviar ramas a nuestra cara y mandíbula. ¿Por qué? Con funciones tan extrañamente redundantes y caminos tortuosos, no parece haber ninguna rima o razón para su estructura, mucho menos para la forma en que estos nervios coinciden con las placas, bloques y barras que componen nuestro cráneo.

Al pensar en estos nervios, me recuerda mis primeros días aquí en Chicago en 2001.

Me habían dado espacio para un laboratorio de investigación en un edificio centenario y el laboratorio necesitaba nuevos cables de servicios, plomería y manejo de aire.

Recuerdo el día en que los contratistas abrieron por primera vez las paredes para acceder a las entrañas del edificio. Su reacción a las tuberías y cables dentro de mi pared fue casi exactamente igual a la mía cuando abrí la cabeza humana y vi los nervios trigéminos y faciales por primera vez. Los cables y tuberías dentro de las paredes eran un desorden. Nadie en su sano juicio habría diseñado un edificio desde cero de esta manera, con los cables y tuberías haciendo extraños bucles y giros por todo el edificio.

Y ese es exactamente el punto. Mi edificio fue construido en 1896, y los servicios públicos reflejan un viejo diseño que ha sido modificado con cada renovación. Si quieres entender el cableado y la fontanería de mi edificio, tienes que entender su historia, cómo fue renovado para cada nueva generación de científicos. Mi cabeza también tiene una larga historia, y esa historia explica los nervios complicados como el trigémino y el facial.

Para nosotros, esa historia comienza con un óvulo fertilizado.

LA ESENCIA EN LOS EMBRIONES

Nadie empieza la vida con una cabeza: el esperma y el óvulo se unen para formar una sola célula. Entre el momento de la concepción y la tercera semana posterior, pasamos de esa única célula a una bola de células, luego a una colección de células con forma de frisbee, y luego a algo que se parece vagamente a un tubo e incluye diferentes tipos de tejidos. Entre los veintitrés y veintiocho días después de la concepción, la parte delantera del tubo se engrosa y se dobla sobre el cuerpo, de modo que el embrión parece como si ya estuviera enroscado en la posición fetal. La cabeza en esta etapa se

ve como un gran globo. La base de este globo tiene la clave de gran parte de la organización básica de nuestras cabezas.

Se desarrollan cuatro pequeñas hinchazones alrededor del área que se convertirá en la garganta. A las tres semanas aproximadamente vemos las dos primeras; las otras dos emergen unos cuatro días después. Cada hinchazón parece bastante humilde por fuera: una simple mancha, separada de la siguiente por un pequeño pliegue. Cuando se sigue lo que sucede con las manchas y los pliegues, se comienza a ver el orden

y la belleza de la cabeza, incluyendo el trigémino y los nervios faciales.

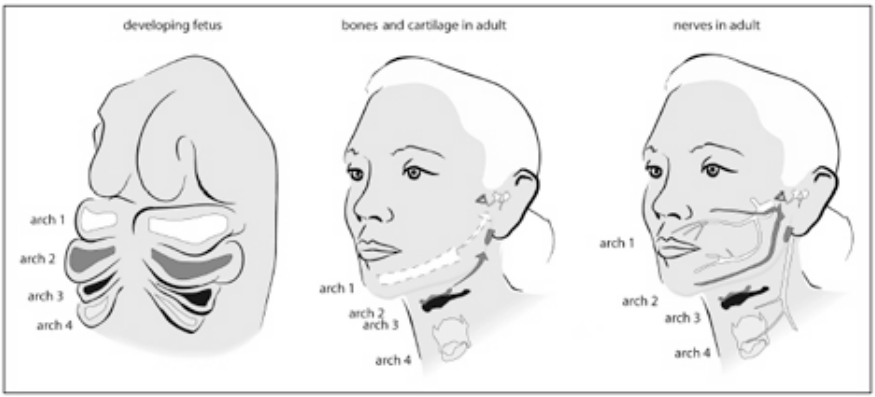
De las células dentro de cada blob, conocidas como arcos, algunas formarán tejido óseo y otras músculo y vasos sanguíneos. Hay una compleja mezcla de células dentro de cada arco; algunas células se dividieron allí mismo mientras que otras migraron un largo camino para entrar en el arco mismo. Cuando identificamos las células de cada arco según el lugar donde terminan en el adulto, las cosas empiezan a tener mucho sentido.

En última instancia, los primeros tejidos del arco forman las mandíbulas superior e inferior, dos pequeños huesos del oído (el martillo y el yunque), y todos los vasos y músculos que los abastecen. El segundo arco forma el tercer pequeño hueso del oído (el estribo), un minúsculo hueso de la garganta, y la mayoría de los músculos que controlan la expresión facial. El tercer arco forma huesos, músculos y nervios más profundos en la garganta; los usamos para tragar. Finalmente, el cuarto arco forma las partes más profundas de nuestra garganta, incluyendo partes de nuestra laringe y los músculos y vasos que la rodean y la ayudan a funcionar.

Si se redujera al tamaño de una cabeza de alfiler y viajara dentro de la boca del embrión en desarrollo, vería las hendiduras que corresponden a cada hinchazón. Hay cuatro de estas hendiduras. Y, como los arcos en el exterior, las células en las hendiduras forman estructuras importantes. La primera se alarga para formar la trompa de Eustaquio y algunas estructuras en el oído. La segunda forma la cavidad que sostiene nuestras amígdalas. La tercera y la cuarta forman glándulas importantes, incluyendo la paratiroides, el timo y la tiroides.

Lo que acabo de darte es uno de los grandes trucos para entender los nervios craneales más complicados y grandes porciones de la cabeza. Cuando pienses en el nervio trigémino, piensa en el primer arco. Nervio facial, segundo arco. La razón por la que el nervio trigémino va tanto a la mandíbula como a la oreja es que todas las estructuras que abastece se desarrol aron originalmente en el primer arco. Lo mismo ocurre con el nervio facial y el segundo arco. ¿Qué tienen en común los músculos de la expresión facial con los músculos del oído que suministra el nervio facial? Todos ellos son derivados del segundo arco. En cuanto a los nervios de los arcos tercero y cuarto, sus

complejos caminos se relacionan con el hecho de que inervan las estructuras que surgieron de sus respectivos arcos. Esos terceros y cuartos arcos nerviosos, entre ellos



el glosofaríngeo y el vago, siguen el mismo patrón que los de delante, cada uno va a estructuras que se desarrollaron a partir del arco al que están asociados.

Si seguimos los arcos branquiales desde un embrión hasta un adulto, podemos rastrear los orígenes de las mandíbulas, las orejas, la laringe y la garganta. Huesos, músculos, nervios y arterias se desarrollan dentro de estos arcos branquiales.

Este plano fundamental de cabezas nos ayuda a dar sentido a uno de los cuentos apócrifos de la anatomía. En 1820, según la historia, Johannes Goethe estaba caminando por el cementerio judío de Viena cuando vio el esqueleto en descomposición de un carnero. Las vértebras estaban expuestas y encima de ellas había un cráneo dañado.

Goethe, en un momento de epifanía, vio que las roturas del cráneo hacían que pareciera un enredo de vértebras. Para Goethe, esto reveló el patrón esencial en su interior: la cabeza está hecha de vértebras que se fusionaron y crecieron en una bóveda para contener nuestros cerebros y órganos sensoriales. Esta fue una idea revolucionaria porque unía las cabezas y los cuerpos como dos versiones del mismo plan fundamental.

La noción debe haber estado en el agua potable a principios de 1800 porque otras personas, entre ellas Lorenz Oken, supuestamente

llegaron a la misma idea en un escenario similar.

Goethe y Oken estaban captando algo muy profundo, aunque no podían saberlo en ese momento. Nuestro cuerpo está segmentado, y este patrón se ve más claramente en nuestras vértebras. Cada vértebra es un bloque que representa un segmento de nuestro cuerpo. La organización de nuestros nervios también es segmentada, correlacionándose estrechamente con el patrón de las vértebras. Los nervios salen de la médula espinal para abastecer al cuerpo. La configuración segmentaria es obvia cuando se observan los niveles de la médula espinal que están asociados con cada parte de nuestro cuerpo. Por ejemplo, los músculos de nuestras piernas son suministrados por nervios que salen de partes más bajas de la médula espinal que los que suministran a nuestros brazos. Las cabezas pueden no parecerlo, pero también contienen un patrón segmentario muy profundo. Nuestros arcos definen segmentos de huesos, músculos, arterias y nervios. Miren en el adulto, y no verán este patrón. Lo vemos sólo en el embrión.

Nuestros cráneos pierden toda evidencia evidente de sus orígenes segmentarios al pasar del embrión al adulto. Los huesos en forma de placa de nuestros cráneos se forman sobre nuestros arcos branquiales, y los músculos, nervios y arterias, que en un

---

principio tenían un patrón segmentario muy simple, se recablean para formar nuestras cabezas de adulto.

Saber algo sobre el desarrollo puede ayudarnos a predecir dónde buscar lo que falta en los niños que tienen ciertos defectos de nacimiento. Por ejemplo, los niños que nacen con el síndrome del primer arco tienen una mandíbula diminuta y orejas que no funcionan, sin el martillo o el yunque. Lo que falta son estructuras que normalmente se habrían formado a partir del primer arco.

Los arcos son el mapa de ruta para los principales trozos del cráneo, desde los nervios craneales más complicados hasta los músculos, las arterias, los huesos y las glándulas del interior. Los arcos también son una guía para algo más: nuestra muy profunda conexión con los tiburones.

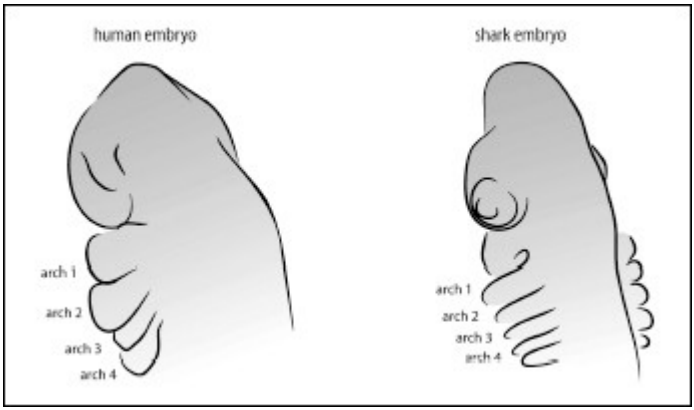
NUESTRO TIBURÓN INTERIOR

El mensaje para l evar a casa de muchos chistes de abogados es que los abogados son un tipo de tiburón especialmente voraz. Enseñando embriología durante una de las recurrentes vogas para estos chistes, recuerdo haber pensado que la broma es para todos nosotros. Todos somos tiburones modificados, o peor aún, hay un abogado dentro de cada uno de nosotros.

Como hemos visto, gran parte del secreto de las cabezas yace en los arcos, las hinchazones que nos dieron el mapa de ruta para los complicados nervios craneales y las estructuras clave dentro de la cabeza. Esas hinchazones y hendiduras de aspecto insignificante han capturado la imaginación de los anatomistas durante 150 años, porque se parecen a las hendiduras branquiales en las regiones de la garganta de los peces y los tiburones.

Los embriones de peces también tienen estas protuberancias y hendiduras. En los peces, las hendiduras se abren finalmente para formar los espacios entre las branquias por donde fluye el agua. En nosotros, las hendiduras normalmente se cierran. En casos anormales, las hendiduras de las branquias no se cierran y permanecen abiertas como bolsas o quistes. Un quiste branquial, por ejemplo, es a menudo un quiste benigno lleno de líquido que se forma en una bolsa abierta dentro del cuello; la bolsa se crea por la incapacidad del tercer o cuarto arco para cerrarse. Rara vez, los niños nacen con un vestigio real de un antiguo cartílago del arco branquial, una pequeña varilla que representa una barra branquial del tercer arco. En estos casos, mis colegas de cirugía están operando un pez interior que desafortunadamente ha regresado para mordernos.

Cada cabeza de cada animal, desde un tiburón hasta un humano, comparte esos cuatro arcos en desarrollo. La riqueza de la historia radica en lo que sucede dentro de



cada arco. Aquí, podemos hacer una comparación punto por punto entre nuestras cabezas y las de los tiburones.

La región branquial de un humano en desarrollo y de un tiburón en desarrollo se ven igual desde el principio.

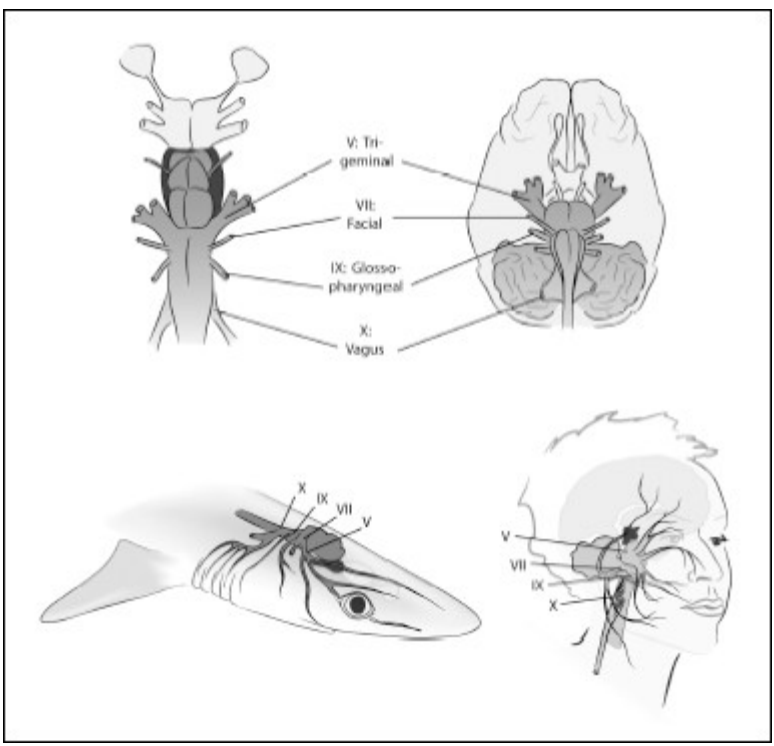
Mira el primer arco en un humano y un tiburón, y encontrarás un estado de cosas muy similar: las mandíbulas. La mayor diferencia es que el primer arco de los humanos también forma algunos huesos del oído, que no vemos en los tiburones. No es de extrañar que el nervio craneal que abastece las mandíbulas de los humanos y los tiburones sea el primer nervio del arco, el nervio trigémino.

Las células dentro del segundo arco branquial se dividen, cambian y dan lugar a una barra de cartílago y músculo. En nosotros, la barra de cartílago se rompe para formar uno de los tres huesos de nuestro oído medio (el estribo) y algunas otras pequeñas estructuras en la base de la cabeza y la garganta. Uno de estos huesos, llamado hioides, nos ayuda a tragar. Toma un trago, escucha música y agradece a las estructuras que se forman a partir de tu segundo arco.

En un tiburón, la segunda varilla del arco se rompe para formar dos huesos que soportan las mandíbulas: uno inferior que se compara con nuestro hioides y uno superior que soporta la mandíbula superior. Si alguna vez has visto a un gran tiburón blanco intentar morder algo, un buzo en una jaula, por ejemplo, probablemente hayas notado que la mandíbula superior puede extenderse y retraerse cuando el tiburón muerde. El hueso superior de este segundo arco es parte del sistema

de palancas de los huesos que rotan para hacerlo posible. Ese hueso superior es notable de otra manera, también. Se compara con uno de los huesos de nuestro oído medio: el estribo. Los huesos que sostienen las mandíbulas superior e inferior en los tiburones se utilizan en nosotros para tragar y escuchar.

En cuanto a los arcos tercero y cuarto, encontramos que muchas de las estructuras que usamos para hablar y tragar son, en los tiburones, partes de tejidos que soportan las branquias. Los músculos y los nervios craneales que usamos para tragar y hablar mueven las branquias en los tiburones y los peces.



A primera vista, nuestros nervios craneales (abajo a la derecha) parecen diferentes a los de un tiburón (abajo a la izquierda). Pero mira de cerca y encontrarás profundas similitudes. Virtualmente todos nuestros nervios están presentes en los tiburones. Los paralelismos son aún más profundos: los nervios equivalentes en los tiburones y los humanos suministran estructuras similares, e incluso salen del cerebro

en el mismo orden (arriba a la izquierda y a la derecha).

Nuestra cabeza puede parecer increíblemente complicada, pero está construida a partir de un simple y elegante plano. Hay un patrón común a todos los cráneos de la Tierra, ya sea que pertenezca a un tiburón, un pez óseo, una salamandra o un humano.

El descubrimiento de este patrón fue un gran logro de la anatomía del siglo XIX, una época en la que los anatomistas ponían bajo el microscopio embriones de todo tipo de especies. En 1872, el anatomista de Oxford Francis Maitland Balfour vio por primera vez el plan básico de las cabezas cuando miró a los tiburones y vio las protuberancias, los arcos branquiales y las estructuras en el interior. Desafortunadamente, murió poco después en un accidente de alpinismo en los Alpes suizos. Sólo tenía treinta años.

GENES DE ARCO BRANQUIAL

Durante las primeras tres semanas después de la concepción, baterías enteras de genes se encienden y apagan en nuestros arcos branquiales y a través de los tejidos que se convertirán en nuestro futuro cerebro. Estos genes instruyen a las células para hacer las diferentes partes de nuestra cabeza. Piense en cada región de nuestra cabeza como si obtuviera una dirección genética que la hace distintiva. Si modificamos esta dirección genética, podemos modificar los tipos de estructuras que se desarrol an allí.

Por ejemplo, un gen conocido como *Otx* está activo en la región frontal, donde se forma el primer arco branquial. Detrás de él, hacia la parte posterior de la cabeza, están

---

activos varios de los llamados genes *Hox*. Cada arco branquial tiene un complemento diferente de genes *Hox activos* en él. Con esta información, podemos hacer un mapa de nuestros arcos branquiales y de la constelación de genes activos en cada uno de ellos.

Ahora podemos hacer experimentos: cambiar la dirección genética de un arco branquial por la de otro. Tomar un embrión de rana, apagar

algunos genes, hacer que las señales genéticas sean similares en el primer y segundo arco, y terminar con una rana que tiene dos mandíbulas: se desarrol a una mandíbula donde normalmente estaría un hueso hioides. Esto muestra el poder de las direcciones genéticas para hacer nuestros arcos branquiales. Si cambias la dirección, cambias las estructuras del arco. El poder de este enfoque es que ahora podemos experimentar con el diseño básico de las cabezas: podemos manipular la identidad de los arcos branquiales casi a voluntad, cambiando la actividad de los genes en su interior.

CABEZAS DE TRACEO: DE LAS MARAVILLAS SIN CABEZA A NUESTROS

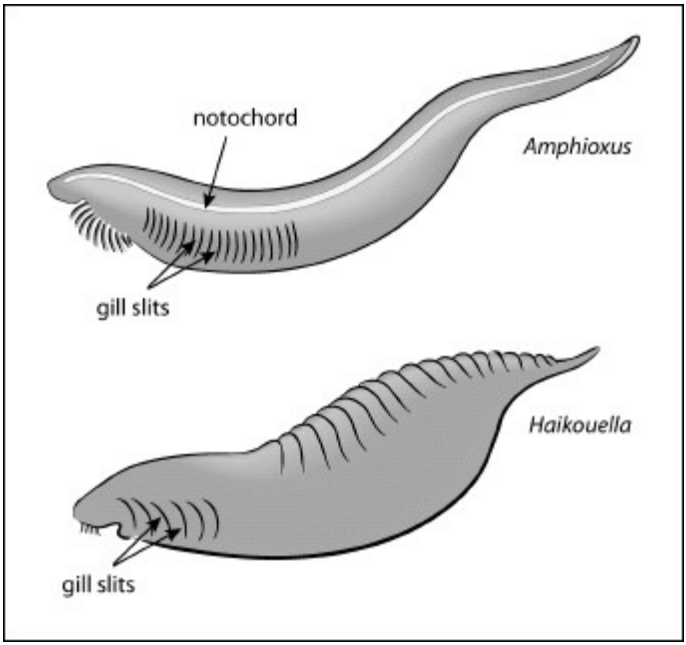
ANTEPASADOS CON CABEZA

¿Por qué detenerse en las ranas y los tiburones? ¿Por qué no extender nuestra comparación a otras criaturas, como insectos o gusanos? ¿Pero por qué haríamos esto cuando ninguna de estas criaturas tiene cráneo, y mucho menos nervios craneales?

Ninguno de ellos tiene ni siquiera huesos. Cuando dejamos el pescado por los gusanos, llegamos a un mundo muy suave y sin cabeza. Sin embargo, si se mira de cerca, hay trozos de nosotros mismos.

Los que enseñamos anatomía comparativa a los estudiantes universitarios normalmente empezamos el curso con una diapositiva de *Amphioxus.* Cada septiembre, cientos de diapositivas de *Amphioxus* aparecen en las pantallas de las salas de conferencias de las universidades desde Maine a California. ¿Por qué? ¿Recuerdan la simple dicotomía entre invertebrados y vertebrados? *Amphioxus* es un gusano, un invertebrado, que comparte muchas características con animales de espina dorsal como peces, anfibios y mamíferos. *Amphioxus* carece de espina dorsal, pero como todas las criaturas con espina dorsal, tiene un cordón nervioso que corre a lo largo de su espalda. Además, una vara recorre la longitud de su cuerpo, paralela a la cuerda nerviosa. Esta varil a, conocida como la notocordio, está llena de una sustancia gelatinosa y proporciona soporte al cuerpo. Como embriones, también tenemos una *notocordio,* pero a diferencia de la de *Anfioxus*, la nuestra se rompe y finalmente se convierte en parte de los discos que se encuentran entre nuestras vértebras. La ruptura de un disco y la sustancia gelatinosa de lo que una vez fue un notocordio puede causar estragos cuando pellizca los nervios o

interfiere con la capacidad de una vértebra para moverse a lo largo de la siguiente. Cuando lesionamos un disco, una parte muy antigua de nuestro cuerpo se rompe. Muchas gracias, *Amphioxus*.



Los parientes más cercanos de los animales con cabeza son los gusanos con hendiduras branquiales. Se muestran *Amphioxus* y una reconstrucción de un gusano fósil (*Haikouella*) de más de 530 millones de años. Ambos gusanos tienen una notocordio, una cuerda nerviosa y aberturas branquiales. El gusano fósil se conoce por más de trescientos especímenes individuales del sur de China.

Amphioxus no es único entre los gusanos. Algunos de los mejores ejemplos no se encuentran en los océanos de hoy en día, sino en las antiguas rocas de China y Canadá.

Enterrados en sedimentos de más de 500 millones de años de antigüedad están los pequeños gusanos que carecen de cabeza, cerebros complejos o nervios craneales.

Puede que no parezcan gran cosa, siendo pequeñas manchas en la roca, pero la preservación de estos fósiles es increíble. Cuando se mira bajo el microscopio, se encuentran impresiones bellamente conservadas que muestran su anatomía suave con todo detalle,

ocasionalmente incluso con impresiones de piel. También muestran otra cosa maravillosa. Son las primeras criaturas con cuerdas nerviosas y notocordes. Estos gusanos nos dicen algo sobre el origen de partes de nuestros cuerpos.

Pero hay algo más que compartimos con estos pequeños gusanos: los arcos branquiales. *Amphioxus,* por ejemplo, los tiene en abundancia, y asociado a cada arco hay una pequeña barra de cartílago. Como los cartílagos que forman nuestras mandíbulas, nuestros huesos del oído, y partes de nuestra caja de voz, estas barras soportan la hendidura branquial. La esencia de nuestra cabeza se remonta a los gusanos, organismos que ni siquiera tienen cabeza. ¿Qué hace *Amphioxus* con los arcos branquiales? Bombea agua a través de ellos para filtrar pequeñas partículas de comida.

De tan humilde comienzo vienen las estructuras básicas de nuestra propia cabeza. Así como los dientes, los genes y las extremidades se han modificado y sus funciones se han reutilizado a lo largo de los años, también lo ha hecho la estructura básica de nuestra cabeza.

CAPÍTULO SEIS

LOS MEJORES PLANES (DEL CUERPO)

Somos un paquete de unos dos billones de células ensambladas de forma muy precisa.

Nuestros cuerpos existen en tres dimensiones, con nuestras células y órganos en sus lugares apropiados. La cabeza está en la parte superior. La médula espinal está hacia nuestra espalda. Nuestras tripas están en el lado del vientre. Nuestros brazos y piernas están a los lados. Esta arquitectura básica nos distingue de las criaturas primitivas organizadas en grupos o discos de células.

El mismo diseño es también una parte importante de los cuerpos de otras criaturas.

Como nosotros, los peces, lagartos y vacas tienen cuerpos simétricos con una parte delantera y trasera, superior e inferior, e izquierda y

derecha. Sus extremos delanteros (correspondientes a la parte superior de un humano erguido) tienen todos cabezas, con órganos sensoriales y cerebros en su interior. Tienen una médula espinal que recorre la longitud del cuerpo a lo largo de la espalda. También como nosotros, tienen un ano, que está en el extremo opuesto de sus cuerpos a la boca. La cabeza está en el extremo delantero, en la dirección en la que normalmente nadan o caminan. Como pueden imaginar, "ano-adelante" no funcionaría muy bien en la mayoría de los escenarios, especialmente los acuáticos. Las situaciones sociales también serían un problema.

Es más difícil encontrar nuestro diseño básico en animales realmente primitivos, medusas, por ejemplo. Las medusas tienen un tipo diferente de plan corporal: sus células están organizadas en discos que tienen una parte superior e inferior. Al carecer de frente y espalda, cabeza y cola, e izquierda y derecha, la organización del cuerpo de la medusa parece muy diferente al nuestro. Ni siquiera te molestes en tratar de comparar tu plan corporal con una esponja. Podrías intentarlo, pero el mero hecho de intentarlo revelaría algo más psiquiátrico que anatómico.

Para compararnos adecuadamente con estos animales primitivos, necesitamos algunas herramientas. Al igual que con las cabezas y las extremidades, nuestra historia está escrita dentro de nuestro desarrollo desde el huevo hasta el adulto. Los embriones contienen las pistas de algunos de los profundos misterios de la vida. También tienen la capacidad de descarrilar mis planes.

EL PLAN COMÚN: COMPARAR LOS EMBRIONES

Entré en la escuela de postgrado para estudiar los mamíferos fósiles y terminé tres años más tarde estudiando los peces y anfibios para mi tesis. Mi caída en desgracia, si quieres llamarlo así, ocurrió cuando empecé a mirar los embriones. Teníamos muchos embriones en el laboratorio: larvas de salamandra, embriones de peces, incluso huevos de gallina fertilizados. Los ponía rutinariamente bajo el microscopio para ver qué estaba pasando. Los embriones de todas las especies parecían pequeños lotes blanquecinos de células, de no más de un

octavo de pulgada de largo. Era emocionante ver el progreso del desarrol o; a medida que el embrión se hacía más grande, la yema, su suministro de alimento, se hacía más y más pequeño. Para cuando la yema desapareció, el embrión era lo suficientemente grande como para eclosionar.

Observar el proceso de desarrollo trajo una enorme transformación intelectual en mí.

De tan simples comienzos embrionarios -pequeñas manchas de células- surgieron aves, ranas y truchas maravil osamente complejas que comprenden trillones de células dispuestas de la manera correcta. Pero había más. Los embriones de peces, anfibios y pollos no se parecían a nada que hubiera visto antes en la biología. Todos se veían generalmente iguales. Todos ellos tenían una cabeza con arcos branquiales. Todos ellos tenían un pequeño cerebro que comenzó su desarrollo con tres inflamaciones. Todos ellos tenían pequeños brotes en las extremidades. De hecho, las extremidades se convirtieron en mi tesis, el foco de mis próximos tres años de trabajo. Aquí, al comparar cómo se desarrolló el esqueleto en aves, salamandras, ranas y tortugas, encontré que miembros tan diferentes como las alas de las aves y las patas de rana se veían muy similares durante su desarrollo. Al ver estos embriones, estaba viendo una arquitectura común. Las especies terminaron pareciendo diferentes, pero empezaron desde un lugar generalmente similar. Mirando los embriones, casi parece que las diferencias entre los mamíferos, aves, anfibios y peces simplemente palidecen en comparación con sus similitudes fundamentales. Entonces me enteré del trabajo de Karl Ernst von Baer.

En el siglo XIX, algunos filósofos de la naturaleza buscaron en los embriones el plan común para la vida en la Tierra. El más importante de estos observadores fue Karl Ernst von Baer. Nacido en una familia noble, inicialmente se entrenó para ser médico. Su mentor académico le sugirió que estudiara el desarrol o de los pollos y tratara de entender cómo se desarrol aban los órganos de los pollos.

Desafortunadamente, Von Baer no podía permitirse incubadoras para trabajar con pollos, ni tampoco muchos huevos. Esto no era muy prometedor. Por suerte para él, tenía un amigo adinerado, Christian Pander, que podía permitirse hacer los experimentos. Al mirar los embriones, encontraron algo fundamental: *todos los órganos de la gallina pueden ser rastreados hasta una de las tres capas de tejido del*

embrión en desarrollo. Estas tres capas se conocieron como las capas de gérmenes. Alcanzaron un estatus casi legendario, que conservan hasta el día de hoy.

Las tres capas de Pander le dieron a von Baer los medios para hacer preguntas importantes. ¿Todos los animales comparten este patrón? ¿Son los corazones, pulmones y músculos de todos los animales derivados de estas capas? Y, lo que es importante, ¿las mismas capas se convierten en los mismos órganos en diferentes especies?

Von Baer comparó las tres capas de embriones de pollo de Pander con todo lo demás que pudo conseguir: peces, reptiles y mamíferos. Sí, cada órgano animal se originó en una de estas tres capas. Significativamente, las tres capas formaron las mismas estructuras en todas las especies. Cada corazón de cada especie se formó a partir de la misma capa. Otra capa dio origen a cada cerebro de cada animal. Y así sucesivamente.

No importa cuán diferentes se vean las especies como adultos, como embriones diminutos todos pasan por las mismas etapas de desarrollo.

Para apreciar plenamente la importancia de esto, necesitamos mirar de nuevo a nuestras primeras tres semanas después de la concepción. En el momento de la fertilización, ocurren grandes cambios dentro del óvulo - el material genético del esperma y el óvulo se fusiona y el óvulo comienza a dividirse. En última instancia, las células forman una bola. En los humanos, durante unos cinco días, el cuerpo unicelular se divide cuatro veces, para producir una bola de dieciséis células. Esta bola de células, conocida como blastocisto, se parece a un globo lleno de líquido. Una delgada pared esférica de células rodea un poco de fluido en el centro. En esta "etapa de blastocisto"

todavía no parece haber ningún plan corporal, no hay frente y espalda, y ciertamente no hay todavía ningún órgano o tejido diferente. Alrededor del sexto día después de la concepción, la bola de células se adhiere al útero de su madre y comienza el proceso de conexión con él para que la madre y el embrión puedan unirse al flujo sanguíneo.

Todavía no hay evidencia del plan del cuerpo. Es muy diferente de esta bola de células a cualquier cosa que reconocerías como cualquier mamífero, reptil o pez, mucho menos un humano.

Si tenemos suerte, nuestra bola de células se ha implantado en el útero de nuestra madre. Cuando un blastocito se implanta en el lugar equivocado, cuando hay una

"implantación ectópica", los resultados pueden ser peligrosos. Alrededor del 96 por ciento de los implantes ectópicos se producen en las trompas uterinas (o de Falopio), cerca de donde se produce la concepción. A veces el moco bloquea el paso fácil del blastocito al útero, haciendo que se implante incorrectamente en las trompas. El embarazo ectópico puede causar varias rupturas de tejido si no se detecta a tiempo. En casos realmente raros, el blastocito es expulsado a la cavidad corporal de la madre, el espacio entre sus intestinos y la pared del cuerpo. En casos aún más raros, estos blastocitos se implantan en el revestimiento exterior del recto o útero de la madre y el feto se desarrolla a término. Aunque estos fetos a veces pueden nacer a través de una incisión abdominal, tal implantación es generalmente muy peligrosa porque aumenta el riesgo de muerte materna por hemorragia en un factor de 90, en comparación con una implantación normal dentro del útero.

En cualquier caso, en esta etapa de desarrol o somos criaturas de aspecto extremadamente humilde. Alrededor del comienzo de nuestra segunda semana después de la concepción, el blastocisto se ha implantado, con una parte de la bola incrustada en la pared del útero, y la otra libre. Piense en un globo empujado en una pared: este disco aplanado se convierte en el embrión humano. *Todo* nuestro cuerpo se forma a partir de sólo la parte superior de este balón, la parte que se empuja en la pared.

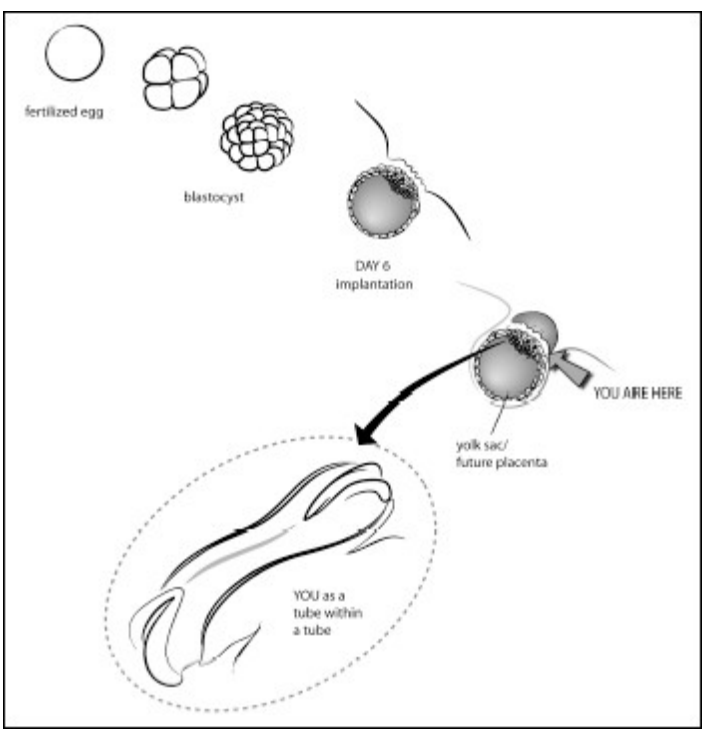
La parte del blastocito que está debajo del disco cubre la yema. En esta etapa de desarrollo, parecemos un Frisbee, un simple disco de dos capas.

¿Cómo es que este Frisbee ovalado termina con las tres capas de gérmenes de Von Baer y se parece en algo a un humano? Primero, las células se dividen y se mueven, causando que los tejidos se plieguen sobre sí mismos. Eventualmente, a medida que los tejidos se mueven y se pliegan, nos convertimos en un tubo con un pliegue de hinchazón en el extremo de la cabeza y otro en la cola. Si nos cortáramos por la mitad ahora mismo, encontraríamos un tubo dentro de un tubo. El tubo exterior sería la pared de nuestro cuerpo, el tubo interior nuestro eventual tracto digestivo. Un espacio, la futura cavidad corporal, separa los dos tubos. Esta estructura de tubo dentro de un tubo se queda con nosotros toda la vida. El tubo intestinal se complica, con un

gran saco para el estómago y largos giros intestinales. El tubo exterior se complica por el pelo, la piel, las costillas y las extremidades que empujan hacia fuera. Pero el plan básico persiste. Puede que seamos más complicados de lo que éramos a los veintiún días de la concepción, pero seguimos siendo un tubo dentro de un tubo, y todos nuestros órganos derivan de una de las tres capas de tejido que aparecieron en nuestra segunda semana después de la concepción.

Los nombres de estas tres capas importantes se derivan de su posición: la capa externa se llama ectodermo, la capa interna endodermo y la capa media mesodermo. El ectodermo forma mucho de la parte exterior del cuerpo (la piel) y el sistema nervioso.

El endodermo, la capa interior, forma muchas de las estructuras internas del cuerpo, incluyendo nuestro tracto digestivo y numerosas glándulas asociadas a él. La capa media, el mesodermo, forma el tejido entre las vísceras y la piel, incluyendo gran parte de nuestro esqueleto y nuestros músculos. Ya sea que el cuerpo pertenezca a un salmón, una gallina, una rana o un ratón, todos sus órganos están formados por el endodermo, el ectodermo y el mesodermo.



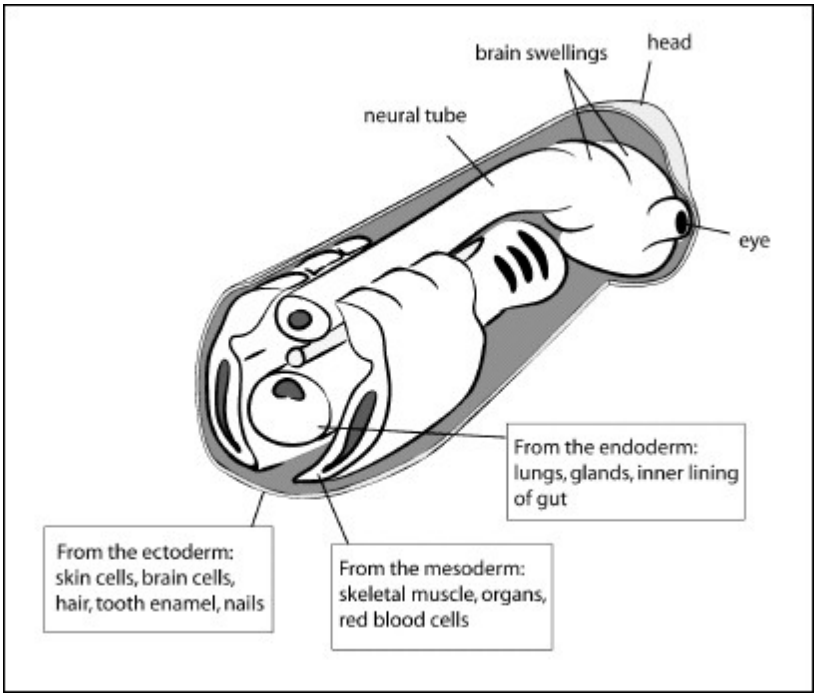
Nuestros primeros días, las primeras tres semanas después de la concepción.

Pasamos de ser una sola célula a una bola de células y terminamos como un tubo.

Von Baer vio cómo los embriones revelan patrones fundamentales de vida. Contrastó dos tipos de características en el desarrollo: características compartidas por todas las especies y características que varían de una especie a otra. Características como el arreglo de tubo dentro de tubo son compartidas por todos los animales con columna vertebral: peces, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Estas características comunes aparecen relativamente pronto en el desarrollo. Los rasgos que nos distinguen -

cerebros más grandes en los humanos, caparazones en las tortugas, plumas en las aves-aparecen relativamente más tarde.

El enfoque de Von Baer es muy diferente de la idea de "la ontogenia recapitula la filogenia" que podrías haber aprendido en la escuela. Von Baer simplemente comparó los embriones y observó que los embriones de diferentes especies se parecían más entre sí que los adultos de esas especies. El enfoque "la ontogenia recapitula la filogenia", defendido décadas más tarde por Ernst Haeckel, afirmaba que cada especie seguía su historia evolutiva a medida que avanzaba en su desarrollo. En consecuencia, el embrión de un humano pasó por una etapa de pez, reptil y mamífero. Haeckel compararía un embrión humano con un pez adulto o un lagarto. Las diferencias entre las ideas de Von Baer y Haeckel pueden parecer sutiles, pero no lo son. En los últimos cien años, el tiempo y las nuevas evidencias han tratado a Von Baer mucho más amablemente. Al comparar los embriones de una especie con los adultos de otra, Haeckel comparaba manzanas con naranjas. Una comparación más significativa es aquella en la que finalmente podemos descubrir los mecanismos que impulsan la evolución. Para ello, comparamos los embriones de una especie con los de otra. Los embriones de diferentes especies no son completamente idénticos, pero sus similitudes son profundas. Todos tienen arcos branquiales, notocordes, y parecen un tubo dentro de un tubo en alguna etapa de su desarrollo. Y, lo que es importante, los embriones tan distintos como los peces y las personas tienen las tres capas de gérmenes de Pander y Von Baer.



A las cuatro semanas de la concepción, somos un tubo dentro de un tubo y tenemos las tres capas de gérmenes que dan origen a todos nuestros órganos.

Todas estas comparaciones nos llevan a la verdadera cuestión que está en juego.

¿Cómo es que el embrión "sabe" desarrollar una cabeza en la parte delantera y un ano en la parte trasera? ¿Qué mecanismos impulsan el desarrol o y hacen que las células y los tejidos sean capaces de formar cuerpos?

Para responder a estas preguntas se requería un enfoque totalmente nuevo. En lugar de simplemente comparar embriones como en los tiempos de Von Baer, teníamos que encontrar una nueva forma de analizarlos. La última parte del siglo XIX marcó el comienzo de la era, que discutimos por primera vez en el capítulo 3, cuando los embriones fueron cortados, injertados, divididos y tratados con prácticamente

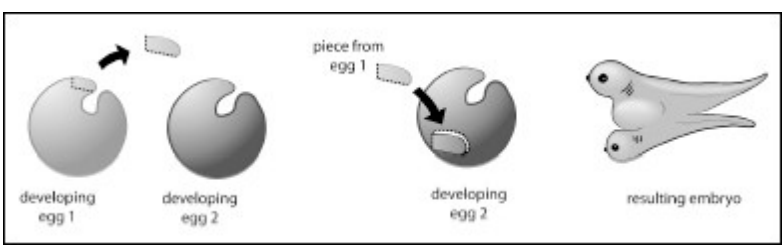
todo tipo de químicos imaginables. Todo en nombre de la ciencia.

EXPERIMENTANDO CON EMBRIONES

A principios del siglo XX, los biólogos se enfrentaban a cuestiones fundamentales sobre los cuerpos. ¿En qué parte del embrión se encuentra la información para construirlos?

¿Está esta información contenida en cada célula o en parches de células? ¿Y qué forma toma esta información, es un tipo especial de químico?

A partir de 1903, el embriólogo alemán Hans Spemann comenzó a investigar cómo las células aprendieron a construir cuerpos durante el desarrollo. Su objetivo era encontrar dónde reside la información sobre la construcción del cuerpo. La gran pregunta para Spemann era si todas las células del embrión tienen suficiente información para construir cuerpos completos, o si esa información está confinada a ciertas partes del embrión en desarrollo.



Trabajando con huevos de tritón, que eran fáciles de obtener y relativamente fáciles de manipular en el laboratorio, Spemann ideó un ingenioso experimento. Cortó un mechón de pelo de su hija pequeña e hizo un lazo en miniatura con él. El pelo de los bebés es un material extraordinario; suave, fino y flexible, es el material ideal para atar una pequeña esfera como un huevo de tritón. Spemann hizo exactamente eso a un huevo de tritón en desarrollo, pellizcando un lado del otro. Manipulando un poco los núcleos de las células, dejó que el artilugio resultante se desarrollara y observó lo que pasó. El embrión formó gemelos: dos salamandras completas emergieron, cada una con un plan corporal normal y cada una completamente viable. La conclusión fue obvia: de un óvulo pueden salir más de un individuo. Esto es lo que son los gemelos idénticos.

Biológicamente, Spemann había demostrado que en el embrión temprano algunas células tienen la capacidad de formar un nuevo individuo por sí mismas.

Este experimento fue sólo el comienzo de una nueva fase de descubrimiento.

En los años 20, Hilde Mangold, una estudiante graduada en el laboratorio de Spemann, comenzó a trabajar con pequeños embriones. El fino control que tenía de sus dedos le permitió hacer algunos experimentos increíblemente exigentes. En la etapa de desarrollo con la que Mangold trabajó, el embrión de salamandra es una esfera de aproximadamente un dieciséis de pulgada de diámetro. Cortó un pequeño trozo de tejido, más pequeño que la cabeza de un alfiler, de una parte del embrión y lo injertó en el embrión de otra especie. Lo que Mangold transplantó no fue cualquier parche, sino un área donde las células que iban a formar gran parte de las tres capas de gérmenes se movían y plegaban. Mangold era tan hábil que los embriones injertados continuaron desarrol ándose, dándole una agradable sorpresa. El parche injertado llevó a la formación de un cuerpo completamente nuevo, incluyendo la médula espinal, la espalda, el vientre, incluso la cabeza.

Con sólo mover un pequeño trozo de tejido en el embrión, Mangold produjo gemelos.

¿Por qué es todo esto importante? Mangold había descubierto una pequeña porción de tejido que era capaz de dirigir a otras células para formar un plan de cuerpo entero.

La pequeña e increíblemente importante porción de tejido que contenía toda esta información se conocería como el Organizador.

El trabajo de tesis de Mangold fue finalmente para ganar el Premio Nobel, pero no para ella. Hilde Mangold murió trágicamente (la estufa de gasolina de su cocina se incendió) antes de que su tesis pudiera ser publicada. Spemann ganó el Premio Nobel

de Medicina en 1935, y el premio cita "su descubrimiento del Organizador y su efecto en el desarrollo embrionario".

Hoy en día, muchos científicos consideran que el trabajo de Mangold es el experimento más importante en la historia de la embriología.

Aproximadamente al mismo tiempo que Mangold hacía experimentos en el laboratorio de Spemann, W. Vogt (también en Alemania) diseñaba técnicas inteligentes para etiquetar células, o lotes de ellas, y así permitir al experimentador observar lo que sucede a medida que el huevo se desarrolla. Vogt fue capaz de producir un mapa del embrión que muestra dónde se origina cada órgano en el huevo. Vemos los antecedentes del plan corporal en los destinos de las células del embrión temprano.

Desde los primeros embriólogos, gente como von Baer, Pander, Mangold y Spemann, hemos aprendido que todas las partes de nuestros cuerpos adultos pueden ser mapeadas a lotes individuales de células en el simple Frisbee de tres capas, y la estructura general del cuerpo es iniciada por la región Organizadora descubierta por Mangold y Spemann.

Cortar, rebanar y trocear, y verás que todos los mamíferos, aves, anfibios y peces tienen Organizadores. Incluso a veces puedes cambiar el Organizador de una especie por otro. Toma la región del Organizador de un pollo e injértala en un embrión de salamandra: obtienes una salamandra gemela.

¿Pero qué es un Organizador? ¿Qué es lo que dentro de él le dice a las células cómo construir cuerpos? El ADN, por supuesto. Y es en este ADN donde encontraremos la receta interna que compartimos con el resto de la vida animal.

DE MOSCAS Y HOMBRES

Von Baer observó el desarrollo de los embriones, comparó una especie con otra y vio patrones fundamentales en los cuerpos. Mangold y Spemann distorsionaron físicamente los embriones para aprender cómo sus tejidos construyen los cuerpos. En la era del ADN, podemos

hacer preguntas sobre nuestra propia composición genética.

¿Cómo controlan nuestros genes el desarrollo de nuestros tejidos y nuestros cuerpos?

Si alguna vez pensó que las moscas no son importantes, considere esto: las mutaciones en las moscas nos dieron pistas importantes sobre los principales genes del plan corporal activos en los embriones *humanos*. Ponemos este tipo de pensamiento en uso en el descubrimiento de los genes que construyen los dedos de las manos y de los pies.

Ahora veremos cómo nos dice sobre las formas en que se construyen cuerpos enteros.

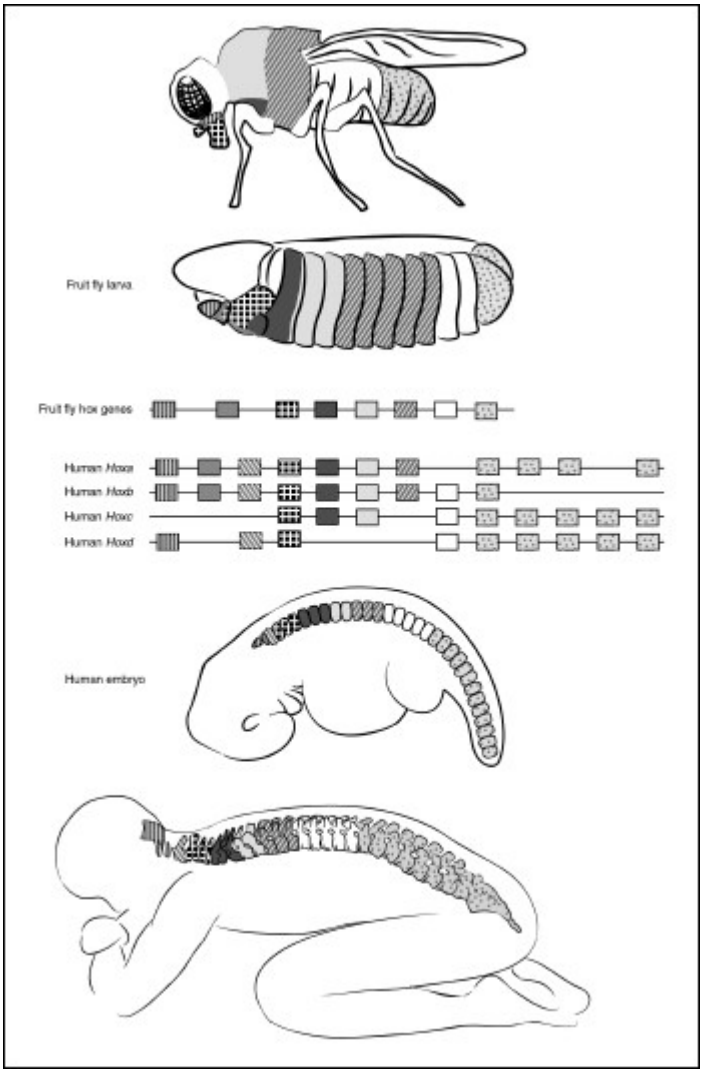
Las moscas tienen un plan para el cuerpo. Tienen un frente y un dorso, una parte superior e inferior, y así sucesivamente. Sus antenas, alas y otros apéndices salen del cuerpo en el lugar correcto. Excepto cuando no lo hacen. Algunas moscas mutantes tienen extremidades que salen de sus cabezas. Otras tienen alas duplicadas y segmentos corporales adicionales. Estas son algunas de las moscas mutantes que nos dicen por qué nuestras vértebras cambian de forma desde el extremo de la cabeza al extremo anal del cuerpo.

La gente ha estado estudiando las moscas anormales durante más de cien años. Los mutantes con un tipo particular de anormalidad recibieron especial atención. Estas moscas tenían órganos en los lugares equivocados - una pata donde debería haber estado una antena; un juego extra de alas - o les faltaban segmentos del cuerpo. Algo estaba interfiriendo con su plan corporal fundamental. En última instancia, estos mutantes surgen de algún tipo de error en el ADN. Recuerde que los genes son tramos de ADN que se encuentran en el cromosoma. Usando una variedad de técnicas que nos permiten visualizar el cromosoma, podemos identificar el parche del cromosoma responsable del efecto mutante. Esencialmente, criamos mutantes para formar una población entera donde cada individuo tiene el error genético. Luego, usando una variedad de marcadores moleculares, comparamos los genes de los individuos con la mutación con los que no la tienen. Esto nos permite identificar la región y el probable estiramiento del cromosoma responsable del efecto mutante. Resulta que una mosca tiene ocho genes que producen tales mutantes. Estos genes se encuentran uno al lado del otro en una de las largas cadenas de ADN de la mosca. Los genes que afectan a los segmentos de la cabeza se encuentran junto a los que afectan a los segmentos del medio de la mosca, la parte del cuerpo que contiene las alas. Estos

trozos de ADN, a su vez, se encuentran adyacentes a los que controlan el desarrollo de la parte trasera de la mosca.

Hay un orden maravilloso en la forma en que los genes están organizados: su posición a lo largo de la cadena de ADN es paralela a la estructura del cuerpo de adelante hacia atrás.

Ahora el desafío era identificar la estructura del ADN realmente responsable de la mutación. Mike Levine y Bill McGinnis, en el laboratorio de Walter Gehring en Suiza, y Matt Scott, en el laboratorio de Tom Kauffman en Indiana, notaron que en el medio de cada gen había una corta secuencia de ADN que era virtualmente idéntica en cada especie que miraban. Esta pequeña secuencia se llama homeobox. Los ocho genes que contienen la homeobox se l aman genes *Hox.* Cuando los científicos buscaron esta secuencia de genes en otras especies, encontraron algo tan uniforme que fue una verdadera sorpresa: *versiones de los genes* Hox *aparecen en cada animal con un cuerpo.*



Los genes *Hox* en las moscas y en las personas. La organización del cuerpo de cabeza a cola está bajo el control de diferentes genes *Hox*. Las moscas tienen un conjunto de ocho genes Hox, cada uno representado como un pequeño cuadro en el diagrama. Los humanos tienen cuatro conjuntos de estos genes. En las moscas y en las personas, la actividad de un gen coincide con su posición en el ADN: los genes activos en la cabeza están en un extremo, los de la cola en otro, y los genes que afectan al centro del cuerpo están en el medio.

Versiones de los mismos genes esculpen la organización de adelante

hacia atrás de los cuerpos de criaturas tan diferentes como moscas y ratones. Si te metes con los genes *Hox, te metes* con el plan del cuerpo de manera predecible. Si haces una mosca que carece de un gen activo en un segmento medio, la sección media de la mosca falta o está alterada. Si haces un ratón que carece de uno de los genes que especifican los segmentos torácicos, transformas partes de la espalda.

Los genes *Hox* también establecen las proporciones de nuestros cuerpos, los tamaños de las diferentes regiones de nuestra cabeza, pecho y espalda baja. Están involucrados en el desarrol o de los órganos, extremidades, genitales y tripas individuales. Los cambios en ellos provocan cambios en la forma en que nuestros cuerpos están juntos.

Diferentes tipos de criaturas tienen diferentes números de genes *Hox*. Las moscas y otros insectos tienen ocho, los ratones y otros mamíferos treinta y nueve. Los treinta y nueve genes *Hox* en los ratones son versiones de los que se encuentran en las moscas.

Esta similitud ha llevado a la idea de que el gran número de genes *Hox de los mamíferos surgió* de una duplicación del complemento más pequeño de los genes de la mosca. A pesar de estas diferencias en número, los genes del ratón están activos de adelante hacia atrás en un orden muy preciso, al igual que los genes de la mosca.

¿Podemos ir aún más profundo en nuestro árbol genealógico, encontrando tramos similares de ADN involucrados en la fabricación de partes aún más fundamentales de nuestros cuerpos? La respuesta, sorprendentemente, es sí. Y nos vincula a los animales incluso más simple que las moscas.

EL ADN Y EL ORGANIZADOR

En la época en que Spemann ganó el Premio Nobel, el Organizador estaba de moda. Los científicos buscaron el misterioso químico que podría inducir el plan de todo el cuerpo.

Pero así como la cultura popular tiene yo-yos y muñecos Tickle Me Elmo, la ciencia tiene modas que crecen y decaen. En la década de

1970, el Organizador fue visto como poco más que una curiosidad, una anécdota ingeniosa en la historia de la embriología. La razón de esta caída en desgracia era que nadie podía descifrar los mecanismos que la hacían funcionar.

El descubrimiento de los genes *Hox* en los años 80 lo cambió todo. A principios de los 90, cuando el concepto de Organizador aún estaba decididamente pasado de moda, el laboratorio de Eddie De Robertis en la UCLA buscaba los genes Hox en ranas, usando técnicas como las de Levine y McGinnis. La búsqueda fue amplia y se obtuvieron muchos tipos diferentes de genes. Uno de ellos tenía un patrón de actividad muy especial. Estaba activo en el sitio exacto del embrión que contiene el Organizador, y estaba activo en el momento exacto del desarrollo. Sólo puedo imaginar lo que De Robertis sintió cuando encontró ese gen. Estaba mirando el Organizador, y allí en el Organizador había un gen que parecía controlarlo específicamente o estar vinculado a su actividad en el embrión.

El Organizador había vuelto.

Los genes organizadores comenzaron a aparecer en los laboratorios de todo el mundo. Mientras hacía otro tipo de experimento, Richard Harland en Berkeley encontró otro gen, al que l amó *Noggin*. *Noggin* hace exactamente lo que un gen Organizador debería hacer. Cuando Harland tomó un poco de *Noggin* y lo inyectó en el lugar correcto en un embrión, funcionó exactamente como el Organizer. El embrión desarrolló dos ejes corporales, incluyendo dos cabezas.

¿Son el gen de De Robertis y *Noggin* los verdaderos trozos de ADN que componen el Organizador? La respuesta es sí y no. Muchos genes, incluyendo estos dos, interactúan para organizar el plan del cuerpo. Tales sistemas son complejos, porque los genes pueden jugar muchos papeles diferentes durante el desarrol o. *Noggin,* por ejemplo, juega un papel en el desarrollo del eje del cuerpo, pero también está involucrado con una serie de otros órganos. Además, los genes no actúan solos para especificar comportamientos celulares complicados como los que vemos en el desarrollo de la cabeza. Los genes interactúan con otros genes en todas las etapas del desarrollo. Un gen

---

puede inhibir la actividad de otro o promoverla. A veces muchos genes interactúan para activar o desactivar otro gen.

Afortunadamente, las nuevas herramientas nos permiten estudiar la actividad de miles de genes en una célula a la vez. Combinando esta tecnología con nuevas formas de interpretación de la función de los genes basadas en la informática, tenemos un enorme potencial para entender cómo los genes construyen células, tejidos y cuerpos.

La comprensión de estas complejas interacciones entre baterías de genes arroja luz sobre los mecanismos reales que construyen los cuerpos. *Noggin* sirve como un gran ejemplo. *Noggin* por sí solo no instruye a ninguna célula del embrión sobre su posición en el eje superior-inferior, sino que actúa en concierto con varios otros genes para hacerlo. Otro gen, el *BMP-4,* es un gen de fondo; se activa en las células que harán el fondo, o el lado del vientre, de un embrión. Hay una importante interacción entre el *BMP-4* y *Noggin*. Dondequiera que *Noggin* esté activo, *el BMP-4* no puede hacer su trabajo. El resultado es que *Noggin* no le dice a las células que se desarrol en como

"células de la parte superior del cuerpo", sino que apaga la señal que las convertiría en células de la parte *inferior*. Estas interacciones de apagado y encendido son la base de prácticamente todos los procesos de desarrollo.

UNA ANÉMONA DE MAR INTERIOR

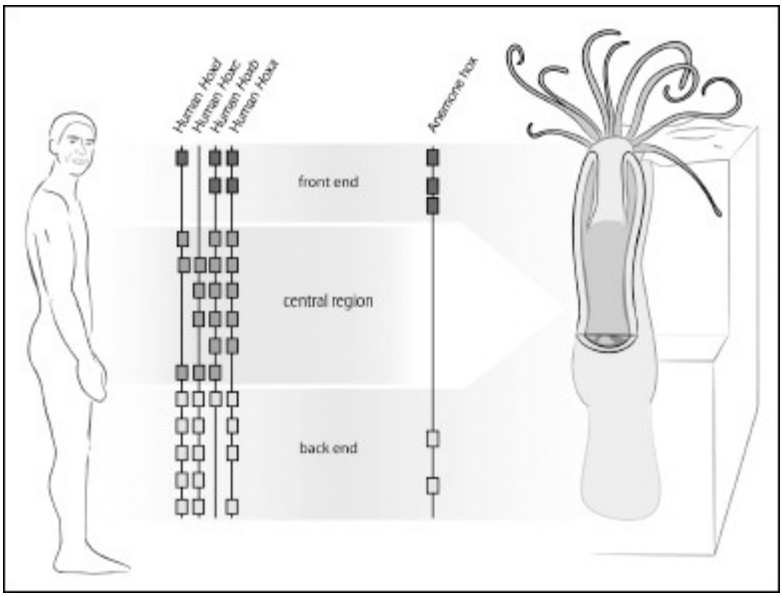
Una cosa es comparar nuestros cuerpos con los de las ranas y los peces. En un sentido real, nosotros y ellos son muy parecidos: todos tenemos una espina dorsal, dos piernas, dos brazos, una cabeza, y así sucesivamente. ¿Y si nos comparamos con algo totalmente diferente, por ejemplo medusas y sus parientes?

La mayoría de los animales tienen ejes corporales definidos por su dirección de movimiento o por el lugar donde se encuentran su boca y su ano en relación con los demás. Piénsalo: nuestra boca está en el extremo opuesto del cuerpo con respecto al ano y, como en los peces e insectos, suele estar en la dirección "hacia adelante".

¿Cómo podemos tratar de vernos en animales que no tienen ninguna cuerda nerviosa? ¿Qué tal sin ano y sin boca? Criaturas como medusas, corales y anémonas de mar tienen boca, pero no ano. La abertura que sirve como boca también sirve para expulsar los

desechos. Aunque esta extraña disposición puede ser conveniente para las medusas y sus parientes, da a los biólogos vértigo cuando tratan de comparar estas criaturas con cualquier otra cosa.

Varios colegas, Mark Martindale y John Finnerty entre ellos, se han sumergido en este problema estudiando el desarrollo de este grupo de animales. Las anémonas de mar han sido notablemente informativas, porque son parientes cercanos de las medusas y tienen un patrón corporal muy primitivo. Además, las anémonas de mar tienen una



forma muy inusual, que a primera vista parecería hacerlas inútiles como forma para comparar con nosotros. Una anémona de mar tiene la forma de un tronco de árbol con un largo muñón central y un montón de tentáculos en el extremo. Esta extraña forma la hace particularmente atractiva, ya que puede tener una parte delantera y una trasera, una parte superior y una inferior. Dibuja una línea desde la boca hasta la base del animal. Los biólogos le han dado un nombre a esa línea: el eje oral-aboral. Pero nombrarla no la convierte en algo más que una línea arbitraria. Si *es* real, entonces su desarrollo debe parecerse al desarrol o de una de las dimensiones de nuestro cuerpo.

Martindale y sus colegas descubrieron que las versiones primitivas de algunos de nuestros principales genes del plan corporal, los que determinan nuestro eje cabeza a ano, están de hecho presentes en la anémona de mar. Y, lo que es más importante, estos genes están activos a lo largo del eje oro-aboral. Esto a su vez significa que el eje

oral-aboral de estas criaturas primitivas es genéticamente equivalente a nuestro eje cabeza a cabeza.

Un eje hacia abajo, otro para ir. ¿Tienen las anémonas de mar algo análogo a nuestro eje vientre-espalda? Las anémonas de mar no parecen tener nada comparable. A pesar de esto, Martindale y sus colegas dieron el audaz paso de buscar en la anémona de mar los genes que especifican nuestro eje vientre-espalda. Sabían cómo eran nuestros genes, y esto les dio una imagen de búsqueda. Descubrieron no uno, sino muchos genes diferentes de vientre a espalda en la anémona de mar. Pero aunque estos genes estaban activos a lo largo de un eje en la anémona de mar, ese eje no parecía correlacionarse con ningún patrón en la forma en que los órganos del animal adulto están juntos.

Los parientes de las medusas, como las anémonas de mar, tienen un frente y un dorso como nosotros, un plan corporal establecido por versiones de los mismos genes.

Lo que podría ser este eje oculto no es aparente desde el exterior del animal. Sin embargo, si cortamos uno por la mitad, encontramos una pista importante, otro eje de simetría. Llamado el eje directivo, parece definir dos lados distintos de la criatura, casi una izquierda y una derecha. Este oscuro eje era conocido por los anatomistas en la década de 1920, pero siguió siendo una curiosidad en la literatura científica.

Martindale, Finnerty y su equipo cambiaron eso.

Todos los animales son iguales pero diferentes. Como la receta de un pastel que se transmite de generación en generación, con mejoras en el pastel de cada uno, la receta que construye nuestros cuerpos ha sido transmitida y modificada durante eones. Puede que no nos parezcamos mucho a las anémonas de mar y las medusas, pero la receta que nos construye es una versión más intrincada de la que las construye.

Una poderosa evidencia de una receta genética común para los cuerpos de los animales se encuentra cuando intercambiamos genes entre especies. ¿Qué sucede cuando intercambias un gen de construcción del cuerpo de un animal que tiene un plan corporal complejo como el nuestro con uno de una anémona de mar? Recordemos el gen *Noggin,* que en ranas, ratones y humanos se activa en lugares que se desarrollarán en estructuras posteriores. Inyecta cantidades extra de la rana Noggin en un huevo de rana, y la rana desarrollará estructuras extras en la espalda, a veces incluso una segunda cabeza. En los embriones de anémona de mar, una versión de *Noggin* también se enciende en un extremo del eje directriz. Ahora, el experimento del millón de dólares: tomar el producto de Noggin de una anémona de mar e inyectarlo en un embrión de rana. El resultado: una rana con estructuras dorsales extra, casi el mismo resultado que si la rana fuera inyectada con su propio Noggin.

Ahora, sin embargo, a medida que retrocedemos en el tiempo, nos quedamos con lo que parece ser una enorme brecha. Todo en este capítulo tenía un cuerpo. ¿Cómo nos comparamos con cosas que no tienen cuerpo, con microbios unicelulares?

CAPÍTULO SIETE

AVENTURAS EN EL CULTURISMO

Cuando no estaba en el campo recolectando fósiles, la mayor parte de mi carrera de graduado la pasé mirando al microscopio, mirando cómo las células se unen para formar huesos.

Tomaría el miembro en desarrol o de una salamandra o una rana, y teñiría las células con tintes que harían que el cartílago en desarrollo se volviera azul y los huesos rojos.

Luego podría hacer que el resto de los tejidos se aclaren tratando el miembro con glicerina. Eran unas preparaciones muy bonitas: el embrión completamente claro y todos los huesos irradiando los colores de los tintes. Era como mirar criaturas hechas de vidrio.

Durante estas largas horas en el microscopio, estaba literalmente observando un animal que se estaba construyendo. Los primeros embriones tendrían pequeños brotes de extremidades y las células en su interior estarían espaciadas uniformemente. Luego, en etapas posteriores, las células se agruparían dentro del brote. En los embriones sucesivamente más viejos, las células tomarían diferentes formas y los huesos se formarían. Cada uno de esos grupos que vi durante las primeras etapas se convirtió en un hueso.

Es difícil no sentirse impresionado viendo a un animal ensamblarse. Al igual que una casa de ladrillo, una extremidad se construye con piezas más pequeñas que se unen para hacer una estructura más grande. Pero hay una gran diferencia. Las casas tienen un constructor, alguien que realmente sabe dónde tienen que ir todos los ladrillos; las extremidades y los cuerpos no. La información que construye las extremidades no está en algún plano arquitectónico, sino que está contenida dentro de cada célula. Imagine una casa que se une espontáneamente a partir de toda la información contenida en los ladrillos: así es como se hacen los cuerpos de los animales.

Mucho de lo que hace a un cuerpo está encerrado dentro de la célula; de hecho, mucho de lo que nos hace únicos también está ahí. Nuestro cuerpo se ve diferente al de una medusa debido a la forma en que nuestras células se unen entre sí, la forma en que se comunican y los diferentes materiales que fabrican.

Antes de que pudiéramos tener un "plan de cuerpo", por no hablar de la cabeza, el cerebro o el brazo, tenía que haber una forma de hacer un cuerpo en primer lugar. ¿Qué significa esto? Para hacer todos los tejidos y estructuras de un cuerpo, las células tenían

---

que saber cómo cooperar para unirse y formar un tipo de individuo completamente nuevo.

Para entender el significado de esto, primero consideremos lo que es un cuerpo.

Luego, abordemos las tres grandes preguntas sobre los cuerpos: ¿Cuándo? ¿Cómo? Y

¿Por qué? ¿Cuándo surgieron los cuerpos, cómo se formaron y, lo más importante, por qué hay cuerpos?

HABEAS CORPUS: MUÉSTRAME EL CUERPO

No todos los grupos de células pueden ser premiados con el honor de ser l amados un cuerpo. Un tapete de bacterias o un grupo de células de la piel es algo muy diferente de un conjunto de células que l amaríamos un individuo. Esta es una distinción esencial; un experimento de pensamiento nos ayudará a ver la diferencia.

¿Qué pasa si le quitas algunas bacterias a un tapete de bacterias? Terminas con un tapete de bacterias más pequeño. ¿Qué sucede cuando se eliminan algunas células de un humano o un pez, por ejemplo, del corazón o del cerebro? Podrías terminar con un humano o un pez muerto, dependiendo de las células que elimines.

Así que el experimento de pensamiento revela uno de los rasgos definitorios de los cuerpos: nuestras partes componentes trabajan juntas para hacer un todo mayor. Pero no todas las partes de los cuerpos son iguales; algunas partes son absolutamente necesarias para la vida. Además, en los cuerpos, hay una división del trabajo entre las partes; los cerebros, corazones y estómagos tienen funciones distintas. Esta división del trabajo se extiende a los niveles más pequeños de la estructura, incluyendo las células, los genes y las proteínas que hacen

los cuerpos.

El cuerpo de un gusano o de una persona tiene una identidad de la que carecen las partes constituyentes: órganos, tejidos y células. Nuestras células de la piel, por ejemplo, están continuamente dividiéndose, muriendo y siendo eliminadas. Sin embargo, usted es el mismo individuo que era hace siete años, a pesar de que prácticamente cada una de sus células de la piel es ahora diferente: las que tenía en ese entonces están muertas y se han ido, reemplazadas por otras nuevas. Lo mismo es cierto de prácticamente todas las células de nuestros cuerpos. Como un río que permanece igual a pesar de los cambios en su curso, contenido de agua, incluso el tamaño, seguimos siendo los mismos individuos a pesar de la continua renovación de nuestras partes.

Y a pesar de este continuo cambio, cada uno de nuestros órganos "sabe" su tamaño y lugar en el cuerpo. Crecemos en las proporciones correctas porque el crecimiento de los huesos de nuestros brazos está coordinado con el crecimiento de los huesos de

---

nuestros dedos y nuestros cráneos. Nuestra piel es lisa porque las células pueden comunicarse para mantener su integridad y la regularidad de su superficie. Hasta que algo fuera de lo común sucede, como, por ejemplo, tenemos una verruga. Las células dentro de la verruga no siguen las reglas: no saben cuándo dejar de crecer.

Cuando se rompe el equilibrio afinado entre las diferentes partes de los cuerpos, la criatura individual puede morir. Un tumor canceroso, por ejemplo, nace cuando un lote de células ya no coopera con otras. Al dividirse sin fin, o al no morir adecuadamente, estas células pueden destruir el equilibrio necesario que hace que un individuo vivo sea una persona. Los cánceres rompen las reglas que permiten a las células cooperar entre sí. Como los matones que rompen las sociedades altamente cooperativas, los cánceres se comportan en su propio interés hasta que matan a su comunidad más grande, el cuerpo humano.

¿Qué hizo posible toda esta complejidad? Para que nuestros lejanos antepasados pasaran de ser criaturas unicelulares a seres con cuerpo, como lo hicieron hace más de mil millones de años, sus células

tuvieron que utilizar nuevos mecanismos para trabajar juntas. Necesitaban ser capaces de comunicarse entre sí. Necesitaban ser capaces de mantenerse juntas de nuevas formas. Y necesitaban ser capaces de hacer cosas nuevas, como las moléculas que hacen que nuestros órganos sean distintos. Estas características, el pegamento entre las células, las formas en que las células pueden

"hablar" entre sí, y las moléculas que las células hacen, constituyen el conjunto de herramientas necesarias para construir todos los diferentes cuerpos que vemos en la Tierra.

La invención de estas herramientas supuso una revolución. El cambio de los animales unicelulares a los animales con cuerpo revela un mundo completamente nuevo.

Surgieron nuevas criaturas con capacidades totalmente nuevas: se hicieron grandes, se movieron y desarrol aron nuevos órganos que les ayudaron a sentir, comer y digerir su mundo.

DESENTERRANDO CUERPOS

Aquí hay un pensamiento humilde para todos nosotros, gusanos, peces y humanos: la mayor parte de la historia de la vida es la historia de las criaturas unicelulares.

Prácticamente todo lo que hemos hablado hasta ahora - animales con manos, cabezas, órganos sensoriales, incluso planos corporales - ha existido sólo durante una pequeña fracción de la historia de la Tierra. Los que enseñamos paleontología a menudo utilizamos la analogía del "año terrestre" para ilustrar lo pequeña que es esa fracción.

Tomemos toda la historia de la Tierra de 4.500 millones de años y reduzcámosla a un solo año, siendo el 1 de enero el origen de la Tierra y la medianoche del 31 de diciembre

el presente. Hasta junio, los únicos organismos eran microbios unicelulares, como algas, bacterias y amebas. El primer animal con cabeza no apareció hasta octubre. El primer humano aparece el 31 de diciembre. Nosotros, como todos los animales y plantas que han vivido, somos los últimos en estrellarse en la fiesta de la vida en la Tierra.

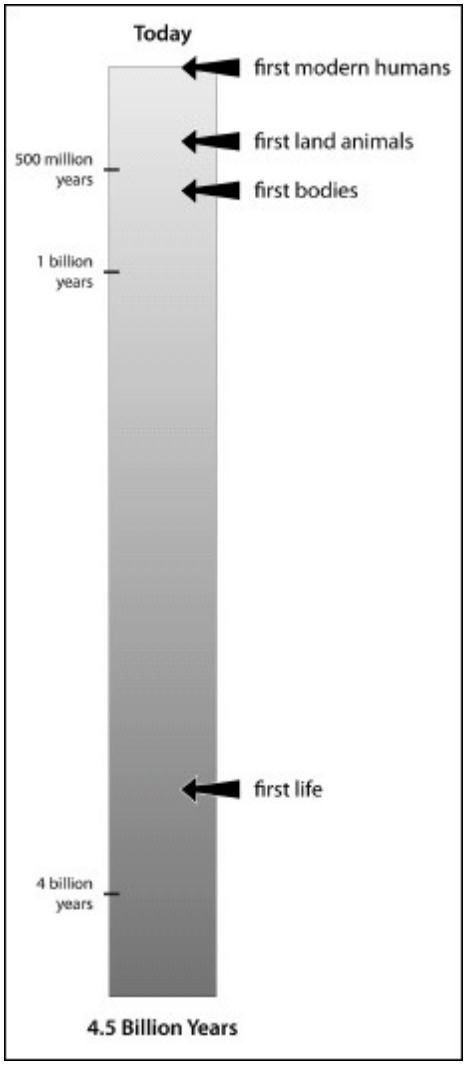
La inmensidad de esta escala de tiempo se hace abundantemente clara cuando miramos las rocas del mundo. Las rocas de más de 600 millones de años generalmente están desprovistas de animales o plantas. En ellas sólo encontramos criaturas unicelulares o colonias de algas. Estas colonias forman esteras o filamentos; algunas colonias tienen forma de pomo. De ninguna manera deben ser confundidas con los cuerpos.

Las primeras personas que vieron los primeros cuerpos en el registro fósil no tenían ni idea de lo que estaban mirando. Entre 1920 y 1960 empezaron a aparecer fósiles muy extraños de todo el mundo. En las décadas de 1920 y 1930, Martin Gurich, un paleontólogo alemán que trabajaba en lo que hoy es Namibia, descubrió una variedad de impresiones de lo que parecían ser cuerpos de animales. Con forma de discos y placas, estas cosas parecían poco notables: podrían haber sido algas primitivas o medusas que vivían en mares antiguos.

En 1947, un geólogo minero australiano llamado Reginald Sprigg se encontró con una localidad donde la parte inferior de las rocas contenía impresiones de discos, cintas y frondas. Trabajando alrededor de una mina abandonada en las colinas de Ediacara, en Australia del Sur, Sprigg descubrió una colección de estos fósiles y los describió con toda claridad. Con el tiempo, se conocieron impresiones similares de todos los continentes del mundo excepto la Antártida. Las criaturas de Sprigg parecían extrañas, pero poca gente se preocupaba realmente por ellas.

La razón del bostezo paleontológico colectivo fue que se pensaba que estos fósiles provenían de las rocas relativamente jóvenes de la era cámbrica, cuando ya se conocían muchos fósiles de animales con cuerpos primitivos. Los fósiles de Sprigg y Gurich pasaron relativamente desapercibidos, un conjunto de impresiones no muy emocionantes, aunque extrañas, de un período ya bien representado en las colecciones de los museos del mundo.

A mediados de la década de 1960, Martin Glaessner, un carismático ex-patriado austriaco que vivía en Australia, cambió todo eso. Después de comparar estas rocas con las de otras partes del mundo, Glaessner demostró que sin duda estos fósiles eran 15 a 20 millones de años más antiguos de lo que se pensaba originalmente. No eran una aburrida colección de impresiones, sino que Gurich, Sprigg y otros estaban viendo los primeros cuerpos.



Una escala de tiempo para los eventos en la historia de la vida. Obsérvese el extremadamente largo período de tiempo durante el cual no hubo cuerpos en la Tierra, sólo organismos unicelulares viviendo solos o en colonias.

Estos fósiles provienen del período conocido como el Precámbrico, cuyo nombre significa literalmente "Antes de la vida". Nuestra comprensión de la antigüedad de la vida acababa de explotar. Las curiosidades paleontológicas se convirtieron en joyas científicas.

Los discos, cintas y frondas precámbricas son claramente las criaturas más antiguas con cuerpo. Como es de esperar de otros fósiles de animales primitivos, incluyen representantes de algunos de los animales más primitivos del planeta hoy en día: esponjas y medusas. Otros fósiles del Precámbrico no se parecen a nada conocido.

Podemos decir que son impresiones de algo con cuerpo, pero sus patrones de manchas, rayas y formas no coinciden con ninguna criatura viviente.

Un mensaje de esto es muy claro: las criaturas con muchas células comenzaron a poblar los mares del planeta hace 600 millones de años. Estas criaturas tenían cuerpos bien definidos y no eran sólo colonias de células. Tienen patrones de simetría que, en algunos casos, se asemejan a los de las formas vivas. En cuanto a las que no se pueden comparar directamente con las formas vivas, las diferentes partes de sus cuerpos tienen, sin embargo, estructuras especializadas. Esto implica que los organismos del Precámbrico tenían un nivel de organización biológica que en ese momento era completamente nuevo en el planeta.

La evidencia de estos cambios se ve no sólo en los cuerpos fósiles sino también en las propias rocas. Con los primeros cuerpos vienen las primeras pistas. Grabados en las

---

rocas son los primeros signos de que las criaturas se arrastraban y retorcían a través del rezumadero. Las primeras huel as, pequeños rasguños en forma de cinta en el barro antiguo, muestran que algunas de estas criaturas con cuerpos eran capaces de movimientos relativamente complicados. No sólo tenían cuerpos con partes identificables, sino que los usaban para moverse de nuevas maneras.

Todo esto tiene sentido. Vemos los primeros cuerpos antes de ver los primeros planos de los cuerpos. Vemos los primeros planos corporales primitivos antes de ver los primeros planos corporales con cabezas, y así sucesivamente. Como el zoológico imaginario por el que caminamos en el primer capítulo, las rocas del mundo están muy ordenadas.

Como dijimos al principio de esta sección, estamos tras el cuándo,

cómo y por qué de los cuerpos. Los descubrimientos del Precámbrico nos dicen el cuándo. Para ver el cómo, y en última instancia el por qué, tenemos que tomar un enfoque ligeramente diferente.

NUESTRO PROPIO CUERPO DE PRUEBAS

Una foto nunca podría capturar cuánto de nuestros cuerpos se encuentra dentro de esos discos, frentes y cintas del Precámbrico. ¿Qué podríamos nosotros los humanos, con toda nuestra complejidad, compartir alguna vez con las impresiones en las rocas, en particular las que parecen medusas arrugadas y rollos de película aplastados?

La respuesta es profunda y, cuando vemos la evidencia, ineludible: la "materia" que nos mantiene unidos, que hace posible nuestros cuerpos, no es diferente de lo que formaron los cuerpos de las antiguas impresiones de Gurich y Sprigg. De hecho, el andamiaje de todo nuestro cuerpo se originó en un lugar sorprendentemente antiguo: animales unicelulares.

¿Qué mantiene un grupo de células juntas, ya sea que formen una medusa o un globo ocular? En criaturas como nosotros, ese pegamento biológico es asombrosamente complicado; no sólo mantiene nuestras células unidas, sino que también permite que las células se comuniquen y formen gran parte de nuestra estructura. El pegamento no es una cosa; es una variedad de diferentes moléculas que se conectan y se encuentran entre nuestras células. A nivel microscópico, le da a cada uno de nuestros tejidos y órganos su aspecto y función distintiva. Un globo ocular tiene un aspecto diferente al de un hueso de la pierna, tanto si lo miramos a simple vista como al microscopio. De hecho, gran parte de la diferencia entre un hueso de la pierna y un ojo se basa en la forma en que las células y los materiales están dispuestos en el interior.

Cada otoño durante los últimos años, he vuelto locos a los estudiantes de medicina con estos conceptos. Los estudiantes nerviosos de primer año deben aprender a identificar órganos mirando diapositivas de tejido al azar bajo un microscopio. ¿Cómo lo hacen?

La tarea es un poco como averiguar en qué país estás mirando un mapa de calles de un pequeño pueblo. La tarea es factible, pero

necesitamos las pistas correctas. En los órganos, algunas de las mejores pistas se encuentran en la forma de las células y en cómo se unen unas con otras. Los tejidos tienen todo tipo de células diferentes, que se adhieren entre sí de diferentes maneras: algunas regiones tienen tiras o columnas de células; en otras, las células están dispersas aleatoriamente y sueltas entre sí. Estas zonas, donde las células están sueltas, suelen estar llenas de materiales que dan a cada tejido sus propiedades físicas características. Por ejemplo, los minerales que se encuentran entre las células óseas determinan la dureza del hueso, mientras que las proteínas más sueltas en la parte blanca de nuestros ojos hacen que la pared del globo ocular sea más flexible.

La capacidad de nuestros estudiantes para identificar órganos en portaobjetos de microscopio, entonces, proviene de saber cómo están dispuestas las células y lo que hay entre ellas. Para nosotros, hay un significado más profundo. Las moléculas que hacen posible estos arreglos celulares son las moléculas que hacen posible los cuerpos. Si no hubiera manera de unir las células entre sí, o si no hubiera materiales entre las células, no habría cuerpos en la tierra, sólo lotes de células. Esto significa que el punto de partida para comprender cómo y por qué surgieron los cuerpos es ver estas moléculas: las moléculas que ayudan a las células a mantenerse unidas, las moléculas que les permiten comunicarse entre sí y las sustancias que se encuentran entre las células.

Para entender la relevancia de esta estructura molecular para nuestros cuerpos, enfoquémonos en detalle en una parte: nuestro esqueleto. Nuestro esqueleto es un poderoso ejemplo de cómo las moléculas diminutas pueden tener un gran impacto en la estructura de nuestro cuerpo y ejemplifica los principios generales que se aplican a todas las partes del cuerpo. Sin los esqueletos, seríamos masas informe de sustancia viscosa. Vivir en la tierra no sería fácil o incluso posible. Gran parte de nuestra biología básica y el comportamiento es posible gracias a nuestro esqueleto que a menudo lo damos por sentado. Cada vez que caminamos, tocamos el piano, inhalamos o masticamos comida tenemos que agradecer a nuestro esqueleto.

Una gran analogía para el funcionamiento de nuestro esqueleto es un puente. La fuerza de un puente depende de los tamaños, formas y proporciones de sus vigas y cables. Pero también, y de manera importante, la resistencia del puente depende de las propiedades microscópicas de los materiales de los que está hecho. La estructura

molecular del acero determina cuán fuerte es y cuán lejos se doblará antes de romperse.

De la misma manera, la fuerza de nuestro esqueleto se basa en los tamaños y formas de nuestros huesos, pero también en las propiedades moleculares de nuestros propios huesos.

Vamos a correr para ver cómo. Al correr por un camino, nuestros músculos se contraen, nuestra espalda, brazos y piernas se mueven, y nuestros pies se empujan contra el suelo para movernos hacia adelante. Nuestros huesos y articulaciones funcionan como un complejo gigante de palancas y poleas que hacen posible todo ese movimiento. Los movimientos de nuestro cuerpo están gobernados por la física básica: nuestra capacidad para correr se basa en gran parte en el tamaño, la forma y las proporciones de nuestro esqueleto y la configuración de nuestras articulaciones. A este nivel, parecemos una gran máquina. Y como una máquina, nuestro diseño coincide con nuestras funciones. Un saltador de altura de clase mundial tiene proporciones óseas diferentes a las de un campeón de sumo. Las proporciones de las patas de un conejo o una rana, especializados en saltar y brincar, son diferentes a las de un caballo.

Ahora, tomemos una vista más microscópica. Ponga un trozo de fémur bajo el microscopio, e inmediatamente verá lo que da al hueso sus propiedades mecánicas distintivas. Las células están altamente organizadas en lugares, particularmente en el borde exterior del hueso. Algunas células se unen, mientras que otras se separan. Entre las células separadas están los materiales que definen la resistencia del hueso. Uno de ellos es la roca, o cristal, conocido como hidroxiapatita, que discutimos en el capítulo 4.

La hidroxiapatita es dura como el hormigón: fuerte cuando se comprime, menos fuerte si se tuerce o se dobla. Así que, como un edificio hecho de ladrillos u hormigón, los huesos tienen una forma que maximiza sus funciones de compresión y minimiza la torsión y el doblado, algo que Galileo reconoció en el siglo XVII.

La otra molécula que se encuentra entre nuestras células óseas es la proteína más común en todo el cuerpo humano. Si la ampliamos 10.000 veces con un microscopio electrónico, vemos algo que parece una cuerda formada por haces de pequeñas fibras moleculares. Esta molécula, el colágeno, también tiene las propiedades mecánicas de una cuerda. La cuerda es relativamente fuerte cuando se tira de ella,

pero se colapsa cuando se comprime; piense en los dos equipos en un tira y afloja corriendo hacia el centro. El colágeno, como la cuerda, es fuerte cuando se tira de él, pero débil cuando los extremos se empujan juntos.

El hueso está compuesto por células que se encuentran en un mar de hidroxiapatita, colágeno y algunas otras moléculas menos comunes. Algunas células se pegan entre sí; otras células flotan dentro de estos materiales. La fuerza del hueso se basa en la fuerza del colágeno cuando se tira de él, y en la fuerza de la hidroxiapatita cuando se comprime.

El cartílago, el otro tejido de nuestro esqueleto, se comporta de manera algo diferente. Durante nuestro trote, era el cartílago de nuestras articulaciones el que proporcionaba las superficies lisas donde nuestros huesos se deslizaban unos contra otros. El cartílago es un tejido mucho más flexible que el hueso; puede doblarse y aplastarse cuando se le aplican fuerzas. El buen funcionamiento de la articulación de la rodilla, así como de la mayoría de las otras articulaciones que usamos durante nuestro trote, depende de tener un cartílago relativamente blando. Cuando el cartílago sano se comprime, siempre vuelve a su forma original, como una esponja de cocina. Durante

cada paso de nuestra carrera, toda nuestra masa corporal se golpea contra el suelo a cierta velocidad. Sin estas capas protectoras en nuestras articulaciones, nuestros huesos se aplastarían unos contra otros: un resultado muy desagradable y debilitante de la artritis.

La flexibilidad del cartílago es una propiedad de su estructura microscópica. El cartílago de nuestras articulaciones tiene relativamente pocas células, y estas células están separadas por mucho relleno entre ellas. Como en el caso del hueso, son las propiedades de este relleno intersticial las que determinan en gran medida las propiedades mecánicas del cartílago.

El colágeno llena gran parte del espacio entre las células del cartílago (así como las células de nuestros otros tejidos). Lo que realmente le da al cartílago su flexibilidad es otro tipo de molécula, una de las más extraordinarias de todo el cuerpo. Este tipo de molécula, llamada complejo de proteoglicanos, le da al cartílago fuerza cuando se aprieta o comprime. Con forma de un gigantesco cepillo tridimensional, con

un largo tallo y muchas pequeñas ramas, el complejo de proteoglicanos es realmente visible bajo un microscopio. Tiene una asombrosa propiedad relevante para nuestras habilidades para caminar y moverse, gracias al hecho de que las ramas más pequeñas adoran adherirse al agua. Un proteoglicano, entonces, es una molécula que en realidad se hincha con agua, l enándose hasta que es como un pedazo gigante de gelatina. Toma este pedazo de gelatina, envuelve cuerdas de colágeno en él y alrededor de él, y terminas con una sustancia que es a la vez flexible y algo resistente a la tensión. Esto, esencialmente, es cartílago. Una almohadilla perfecta para nuestras articulaciones. El papel de las células del cartílago es secretar estas moléculas cuando el animal está creciendo y mantenerlas cuando el animal no lo está.

Las proporciones entre los diversos materiales definen gran parte de las diferencias mecánicas entre hueso, cartílago y dientes. Los dientes son muy duros y, como era de esperar, hay mucha hidroxiapatita y relativamente poco colágeno entre las células del esmalte. El hueso tiene relativamente más colágeno, menos hidroxiapatita y no tiene esmalte. Por consiguiente, no es tan duro como los dientes. El cartílago tiene mucho colágeno y nada de hidroxiapatita, y está cargado de proteoglicanos. Es el más suave de los tejidos de nuestro esqueleto. Una de las principales razones por las que nuestros esqueletos se ven y funcionan como lo hacen es que estas moléculas se despliegan en los lugares correctos en las proporciones adecuadas.

¿Qué tiene que ver todo esto con el origen de los cuerpos? Una propiedad es común a los animales, tengan o no esqueletos: todos ellos, incluyendo los grupos de células, tienen moléculas que se encuentran entre sus células, específicamente diferentes tipos de colágenos y proteoglicanos. El colágeno parece ser particularmente importante: la proteína más común en los animales, constituye más del 90 por ciento de la proteína del cuerpo en peso. El culturismo en el pasado lejano significó que moléculas como estas tuvieron que ser inventadas.

Otra cosa es esencial para los cuerpos: las células de nuestros huesos tienen que ser capaces de mantenerse juntas y hablar unas con otras. ¿Cómo se adhieren las células óseas entre sí, y cómo saben las diferentes partes de los huesos que deben comportarse de forma diferente? Aquí es donde se encuentra gran parte de nuestro equipo de culturismo.

Las células óseas, como todas las células de nuestro cuerpo, se adhieren entre sí por medio de diminutos remaches moleculares, de los cuales hay una gran diversidad.

Algunas se unen a las células de la forma en que el cemento de contacto mantiene unidas las suelas de los zapatos: una molécula está firmemente unida a la membrana exterior de una célula, otra a la membrana exterior de una célula vecina. Así unido a ambas membranas celulares, el pegamento forma un vínculo estable entre las células.

Otros remaches moleculares son tan precisos que se unen selectivamente, sólo al mismo tipo de remache. Esta es una característica enormemente significativa porque ayuda a organizar nuestros cuerpos de una manera fundamental. Estos remaches selectivos permiten que las células se organicen y aseguran que las células óseas se adhieran a las células óseas, piel a piel, etc. Pueden organizar nuestros cuerpos en ausencia de otra información. Si ponemos un número de células, cada una con un tipo diferente de este tipo de remache, en un plato y dejamos que las células crezcan, las células se organizarán. Algunas pueden formar bolas, otras hojas, ya que las células se clasifican por los números y tipos de remaches que tienen.

Pero podría decirse que la conexión más importante entre las células radica en la forma en que intercambian información entre ellas. El patrón preciso de nuestro esqueleto, de hecho de todo nuestro cuerpo, sólo es posible porque las células saben cómo comportarse. Las células necesitan saber cuándo dividirse, cuándo fabricar moléculas y cuándo morir. Si, por ejemplo, las células óseas o cutáneas se comportaran al azar, si se dividieran demasiado o murieran demasiado poco, entonces estaríamos muy feos o, peor aún, muy muertos.

Las células se comunican entre sí usando "palabras" escritas como moléculas que se mueven de una célula a otra. Una célula puede "hablar" con la siguiente enviando moléculas de ida y vuelta. Por ejemplo, en una forma relativamente simple de comunicación de célula a célula, una célula emitirá una señal, en este caso una molécula.

Esta molécula se unirá a la cubierta exterior, o membrana, de la célula que recibe la señal. Una vez adherida a la membrana exterior, la molécula desencadenará una reacción en cadena de eventos

moleculares que viajan desde la membrana exterior hasta el núcleo de la célula, en muchos casos. Recuerda que la información genética se encuentra dentro del núcleo. Por consiguiente, esta señal molecular puede causar que los genes se enciendan y apaguen. El resultado final de todo esto es que la célula que recibe la información ahora cambia su comportamiento: puede morir, dividirse o hacer nuevas moléculas en respuesta a la señal de la otra célula.

En el nivel más básico, estas son las cosas que hacen posible los cuerpos. Todos los animales con cuerpo tienen moléculas estructurales como colágenos y proteoglicanos, todos ellos tienen el conjunto de remaches moleculares que mantienen a las células unidas, y todos ellos tienen las herramientas moleculares que permiten a las células comunicarse entre sí.

Ahora tenemos una imagen de búsqueda para entender el cómo de los orígenes del cuerpo. Para ver cómo surgieron los cuerpos, necesitamos buscar estas moléculas en los cuerpos más primitivos del planeta, y luego, en última instancia, en criaturas que no tienen ningún cuerpo.

FISICOCULTURISMO PARA LOS GLÓBULOS ROJOS

¿Qué comparte el cuerpo de un profesor con una mancha? Veamos algunos de los cuerpos más primitivos que existen hoy en día para encontrar la respuesta.

Una de estas criaturas tiene la dudosa distinción de casi nunca ser vista en la naturaleza. A finales de 1880, una criatura extrañamente simple fue descubierta viviendo en las paredes de cristal de un acuario. A diferencia de cualquier otra cosa viva, se veía como una masa de sustancia viscosa. Con lo único que podemos compararla es con la criatura alienígena de la película de Steve McQueen " *The Blob"*. Recordemos que el Blob era un globo amorfo que, después de caer del espacio exterior, engul ía a su presa: perros, gente, y eventualmente pequeños comensales en pequeños pueblos de Pennsylvania. El extremo digestivo de la mancha estaba en su parte inferior: nunca la vimos; sólo oímos los chillidos de las criaturas atrapadas allí. Si reducimos la mancha a entre 200 y 1.000 células, de unos dos milímetros de diámetro, tenemos la enigmática criatura viviente

conocida como placozoan. Los placozoos tienen sólo cuatro tipos de células, que forman un cuerpo muy simple con forma de pequeña placa. Sin embargo, es un cuerpo real. Algunas de las células de la superficie inferior están especializadas para la digestión; otras tienen flagelos, que laten para mover a la criatura. Tenemos poca idea de lo que comen en la naturaleza, dónde viven, o cuál es su hábitat natural.

Sin embargo, estos simples glóbulos revelan algo terriblemente importante: con un pequeño número de células especializadas, estas criaturas primitivas ya tienen una división del trabajo entre sus partes.

Mucho de lo que es interesante sobre los cuerpos ya existe en los placozoos. Tienen verdaderos cuerpos, aunque primitivamente organizados. Al buscar en su ADN y examinar las moléculas de la superficie de sus células, encontramos que gran parte de nuestro aparato de culturismo ya está allí. Los placozoos tienen versiones de los remaches moleculares y herramientas de comunicación celular que vemos en nuestros propios cuerpos.

Nuestro aparato de fisicoculturismo se encuentra en manchas más simples que algunas de las antiguas impresiones de Reginald Sprigg. ¿Podemos ir más lejos, a tipos de cuerpos aún más primitivos? Parte de la respuesta se encuentra en un utensilio de cocina clásico: la esponja. A primera vista, las esponjas no son notables. El cuerpo de una esponja consiste en la propia matriz de la esponja; no es un material vivo, es una forma de sílice (material vítreo) o carbonato de calcio (un material duro parecido a una cáscara) con algo de colágeno intercalado. De entrada, eso hace que las esponjas sean interesantes. Recordemos que el colágeno es una parte importante de nuestros espacios intercelulares, que mantiene las células y muchos tejidos juntos. Las esponjas pueden no parecerlo, pero ya tienen una de las marcas de los cuerpos.

A principios de 1900, H.V.P. Wilson mostró lo asombrosas que son las esponjas.

Wilson llegó a la Universidad de Carolina del Norte como su primer profesor de biología en 1894. Allí entrenó a un grupo de biólogos americanos que definirían el campo de la genética y la biología celular en Norteamérica para el próximo siglo. De joven, Wilson decidió centrar la investigación de su vida en, entre otras cosas, las esponjas. Uno de sus experimentos reveló una capacidad realmente notable de estas criaturas aparentemente simples. Las pasó por una especie de

tamiz, que las descompuso en un conjunto de células desagregadas. Wilson puso las ahora completamente desagregadas, células parecidas a amebas en un plato y las observó. Al principio, se arrastraron por la superficie del plato. Luego, algo sorprendente sucedió: las células se unieron. Primero, formaron bolas de células rojas y nubosas. Luego, se organizaron más, y las células se empaquetaron en patrones definidos. Finalmente, el grupo de células formaría un nuevo cuerpo de esponja, con los diversos tipos de células asumiendo las posiciones apropiadas. Wilson estaba viendo cómo un cuerpo se unía casi desde el principio. Si fuéramos como esponjas, entonces el personaje de Steve Buscemi que es picado en la astilladora de madera en la película de los hermanos Coen, *Fargo, estaría* bien. De hecho, podría haber sido vigorizado por la experiencia, ya que sus células podrían haberse agregado para formar muchas versiones diferentes de él.

Son las células dentro de las esponjas las que las hacen útiles para comprender el origen de los cuerpos. El interior de la esponja suele ser un espacio hueco que puede dividirse en compartimentos, dependiendo de la especie. El agua fluye a través del espacio, dirigida por un tipo de célula muy especial. Estas células tienen forma de copas con la parte de la copa mirando hacia el interior de la esponja. Los diminutos cilios que se extienden desde el borde de la copa laten y capturan las partículas de comida en el agua. También se extiende desde la parte de la copa de cada una de estas células un gran flagelo. La acción concertada de los flagelos de estas pequeñas células batidoras mueve el agua y los alimentos a través de los poros de la esponja. Otras células en el interior de la esponja procesan las partículas de comida. Otras se alinean en el exterior y pueden contraerse cuando la esponja necesita cambiar su forma al cambiar las corrientes de agua.

Una esponja parece estar muy lejos de un cuerpo, sin embargo, tiene muchas de las propiedades más importantes de los cuerpos: sus células tienen una división del

trabajo, las células pueden comunicarse entre sí, y el conjunto de células funciona como un solo individuo. Una esponja está organizada, con diferentes tipos de células en diferentes lugares haciendo cosas diferentes. Es muy distinto a un cuerpo humano con trillones de células empaquetadas con precisión, pero comparte algunas de las características del cuerpo humano. Lo más significativo es que la esponja tiene gran parte del aparato de adhesión, comunicación y andamiaje celular que tenemos. Las esponjas son cuerpos, aunque muy

primitivos y relativamente desorganizados.

Como los placozoos y las esponjas, tenemos muchas células. Como ellos, nuestros cuerpos muestran una división del trabajo entre las partes. Todo el aparato molecular que mantiene los cuerpos unidos también está presente: los remaches que mantienen las células unidas, los diversos dispositivos que ayudan a las células a comunicarse entre sí y muchas de las moléculas que se encuentran entre las células. Al igual que nosotros y todos los demás animales, los placozoos y las esponjas tienen incluso colágeno. A diferencia de nosotros, tienen versiones muy primitivas de todas estas características: en lugar de veintiún colágenos, las esponjas tienen dos; mientras que nosotros tenemos cientos de tipos diferentes de remaches moleculares, las esponjas tienen una pequeña fracción de ese número. Las esponjas son más simples que nosotros y tienen menos tipos de células, pero el aparato básico de culturismo está ahí.

Los placozoos y las esponjas son tan simples como los cuerpos de hoy en día. Para ir más lejos, tenemos que buscar las cosas que construyen nuestros cuerpos en criaturas que no tienen ningún cuerpo: microbios unicelulares.

¿Cómo se compara un microbio con un animal con un cuerpo? ¿Las herramientas que construyen cuerpos en los animales están presentes en las criaturas unicelulares? Si es así, y si no están construyendo cuerpos, ¿qué están haciendo?

La forma más directa de empezar a responder estas preguntas implica mirar dentro de los genes de los microbios para buscar cualquier similitud con los animales. Las primeras comparaciones entre los genomas animales y microbianos revelaron un hecho sorprendente: en muchos animales unicelulares, gran parte de la maquinaria molecular para la adhesión e interacción celular, etc., simplemente no existe. Algunos análisis incluso sugirieron que más de ochocientas de estas clases de moléculas se encuentran sólo en animales con cuerpo mientras que están ausentes en criaturas unicelulares. Esto parecería apoyar la noción de que los genes que ayudan a las células a unirse para hacer cuerpos surgieron junto con el origen de los cuerpos. Y a primera vista, parece tener sentido que las herramientas para construir cuerpos surjan al mismo tiempo que los propios cuerpos.

La historia se dio vuelta cuando Nicole King, de la Universidad de California en Berkeley, estudió los organismos llamados choanoflagelados. La elección de King del tema no fue un accidente. A partir del trabajo en el ADN, sabía que los choanoflagelados son probablemente los parientes microbianos más cercanos de los animales con

cuerpos, placozoos y esponjas. También sospechaba que escondidas en los genes de los choanoflagelados hay versiones del ADN que hacen nuestros cuerpos.

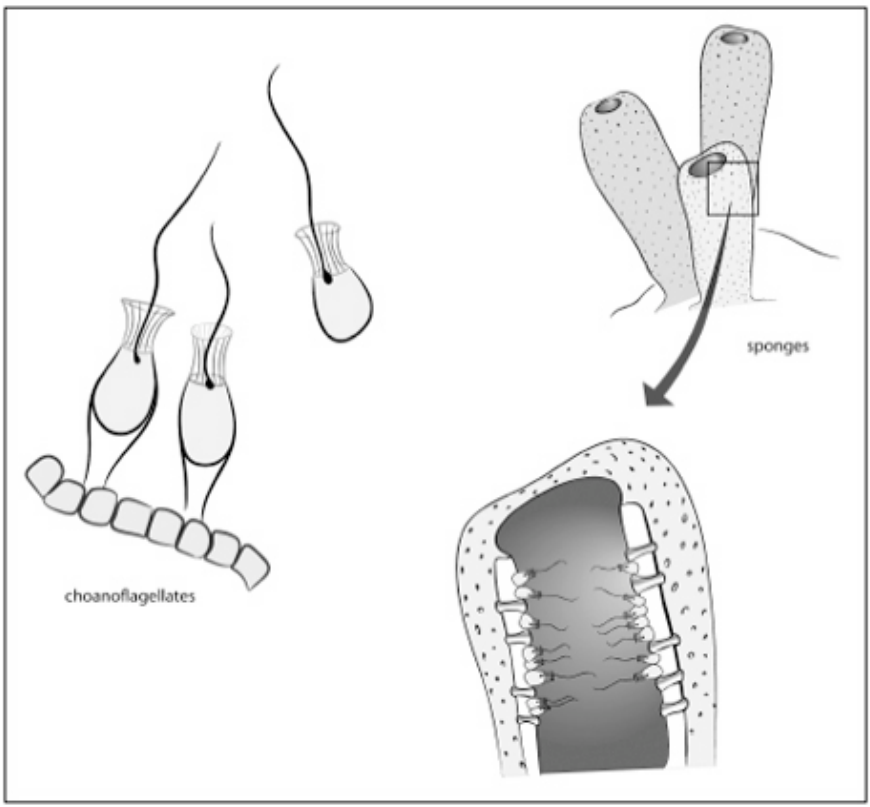
Nicole fue ayudada en su búsqueda por el Proyecto del Genoma Humano, una empresa que ha tenido éxito en el mapeo de todos los genes de nuestros cuerpos. Con el éxito del Proyecto del Genoma Humano vinieron muchos otros estudios de mapeo: hemos tenido el Proyecto del Genoma de la Rata, el Proyecto del Genoma de la Mosca, el Proyecto del Genoma del Abejorro, incluso hay proyectos en curso para secuenciar los genomas de las esponjas, placozoos y microbios. Estos mapas son una mina de oro de información porque nos permiten comparar los genes de construcción del cuerpo en muchas especies diferentes. También le dieron a Nicole las herramientas genéticas para estudiar sus choanoflagelados.

Los choanoflagelados se parecen notablemente a las células con forma de copa dentro de una esponja. De hecho, durante mucho tiempo, mucha gente pensó que eran sólo esponjas degeneradas, es decir, esponjas sin todas las demás células. Si este fuera el caso, entonces el ADN de los choanoflagelados debería parecerse al de una extraña esponja. No es así. Cuando se compararon partes del ADN de los choanoflagelados con el ADN de los microbios y las esponjas, la similitud con el ADN de los microbios resultó ser extraordinaria. Los choanoflagelados son microbios unicelulares.

La distinción genética entre "microbio unicelular" y "animal con cuerpo" se rompió completamente gracias al trabajo de Nicole sobre los choanoflagelados. La mayoría de los genes que son activos en los choanoflagelados también son activos en los animales.

De hecho, muchos de esos genes forman parte de la maquinaria que construye los cuerpos. Unos pocos ejemplos revelan el poder de esta comparación. Las funciones de adhesión y comunicación celular, incluso partes de las moléculas que forman la matriz entre las células y las cascadas moleculares que transportan una señal desde el exterior

de la célula hacia el interior, están presentes en los choanoflagelados. Los colágenos están presentes en los choanoflagelados. Los diversos tipos de remaches moleculares que mantienen unidas a las células también están presentes en los choanoflagelados, aunque hacen trabajos ligeramente diferentes.



Choanoflagelados (izquierda) y esponjas (derecha).

Los choanoflagelados incluso le dan a Nicole una hoja de ruta para comparar nuestro aparato de culturismo con el de otros microbios. La estructura molecular fundamental que hace los colágenos y los agregados de proteoglicanos se conoce de un número de diferentes tipos de microbios. Las bacterias *estreptococos, comunes* en nuestras bocas (y, se espera, raras en otros lugares), tienen en su superficie celular una molécula muy similar al colágeno. Tiene la misma firma molecular, pero no se agrega para formar cuerdas o láminas como lo hacen los colágenos en los animales. Del mismo modo, algunos de los

azúcares que forman los complejos proteoglicanos dentro de nuestro cartílago se ven en las paredes de diferentes tipos de bacterias. Sus funciones tanto en los virus como en las bacterias no son particularmente agradables. Están asociadas con las formas en que estos agentes invaden e infectan las células y, en muchos casos, se vuelven más virulentas. Muchas de las moléculas que los microbios usan para causarnos miseria son versiones primitivas de las moléculas que hacen posible nuestro propio cuerpo.

Esto crea un rompecabezas. En el registro fósil, no vemos nada más que microbios durante los primeros 3.500 millones de años de la historia de la Tierra. Entonces, de repente, en un lapso de quizás 40 millones de años, aparecen todo tipo de cuerpos: cuerpos de plantas, cuerpos de hongos, cuerpos de animales; cuerpos por todas partes.

Los cuerpos eran una verdadera moda. Pero, si tomamos el trabajo de Nicole al pie de la letra, el potencial para construir cuerpos estaba en su lugar mucho antes de que los cuerpos llegaran a la escena. ¿Por qué el apuro por los cuerpos después de tanto tiempo sin ningún cuerpo?

UNA TORMENTA PERFECTA EN EL ORIGEN DE LOS CUERPOS

El tiempo lo es todo. Las mejores ideas, inventos y conceptos no siempre ganan.

¿Cuántos músicos, inventores y artistas se adelantaron tanto a su tiempo que fracasaron y fueron olvidados, para ser redescubiertos más tarde? No necesitamos mirar más allá de la pobre Garza de Alejandría, quien, quizás en el siglo I d.C., inventó la turbina de vapor. Desafortunadamente, fue considerada como un juguete. El mundo no estaba preparado para ello.

La historia de la vida funciona de la misma manera. Hay un momento para todo, tal vez incluso para los cuerpos. Para ver esto, necesitamos entender por qué los cuerpos podrían haber surgido en primer lugar.

Una teoría sobre esto es extremadamente simple: ¿Quizás los cuerpos surgieron cuando los microbios desarrol aron nuevas formas de

comerse entre sí o evitar ser comidos? Tener un cuerpo con muchas células permite a las criaturas crecer. Crecer es a menudo una muy buena manera de evitar ser comido. Los cuerpos pueden haber surgido como ese tipo de defensa.

Cuando los depredadores desarrollan nuevas formas de comer, las presas desarrollan nuevas formas de evitar ese destino. Esta interacción puede haber l evado al origen de muchas de nuestras moléculas de culturismo. Muchos microbios se alimentan adhiriéndose y engul endo a otros microbios. Las moléculas que permiten a los microbios atrapar a sus presas y retenerlas son candidatos probables para las moléculas que forman los remaches de unión entre las células de nuestros cuerpos.

Algunos microbios pueden realmente comunicarse entre sí haciendo compuestos que influyen en el comportamiento de otros microbios. Las interacciones predador-presa entre los microbios a menudo implican pistas moleculares, ya sea para alejar a los depredadores potenciales o para servir como señuelo para atraer a la presa a acercarse.

Tal vez señales como estas fueron precursoras de los tipos de señales que nuestras propias células usan para intercambiar información para mantener nuestros cuerpos intactos.

Podríamos especular sobre esto hasta el infinito, pero más emocionante sería alguna evidencia experimental tangible que muestre cómo la depredación puede producir cuerpos. Eso es esencialmente lo que Martin Boraas y sus colegas proporcionaron.

Tomaron un alga que normalmente es unicelular y la dejaron vivir en el laboratorio por más de mil generaciones. Luego introdujeron un depredador: una criatura unicelular con un flagelo que engulle a otros microbios para ingerirlos. En menos de doscientas generaciones, el alga respondió convirtiéndose en un grupo de cientos de células; con el tiempo, el número de células disminuyó hasta que sólo había ocho en cada grupo.

Ocho resultaron ser el óptimo porque formaba grupos lo suficientemente grandes como para evitar ser ingeridos, pero lo suficientemente pequeños como para que cada célula pudiera captar luz para sobrevivir. Lo más sorprendente sucedió cuando el depredador

fue eliminado: las algas continuaron reproduciéndose y formando individuos con ocho células. En resumen, una versión simple de una forma multicelular había surgido de un no-cuerpo.

Si un experimento puede producir una simple organización corporal de un no-cuerpo en varios años, imagina lo que podría suceder en miles de millones de años. La pregunta entonces no es cómo podrían surgir los cuerpos, sino por qué no surgieron antes.

Las respuestas a este rompecabezas podrían estar en el antiguo entorno en el que surgieron los cuerpos: el mundo puede no haber estado preparado para los cuerpos.

Un cuerpo es algo muy caro de tener. Hay ventajas obvias de convertirse en una criatura con un cuerpo grande: además de evitar los depredadores, los animales con cuerpo pueden comer otras criaturas más pequeñas y moverse activamente a grandes distancias. Ambas habilidades permiten a los animales tener más control sobre su entorno. Pero ambas consumen mucha energía. Los cuerpos requieren aún más energía a medida que crecen, particularmente si incorporan colágeno. El colágeno requiere una cantidad relativamente grande de oxígeno para su síntesis y habría incrementado enormemente la necesidad de nuestros antepasados de este importante elemento metabólico.

Pero el problema era este: los niveles de oxígeno en la antigua Tierra eran muy bajos.

Durante miles de millones de años los niveles de oxígeno en la atmósfera no se acercaron a los actuales. Entonces, hace aproximadamente mil millones de años, la cantidad de oxígeno aumentó drásticamente y se ha mantenido relativamente alta desde entonces. ¿Cómo sabemos esto? Por la química de las rocas. Las rocas de hace unos mil millones de años muestran la firma reveladora de haberse formado con cantidades crecientes de oxígeno. ¿Podría el aumento de oxígeno en la atmósfera estar relacionado con el origen de los cuerpos?

Puede que haya sido necesario el equivalente paleontológico de una tormenta perfecta para producir cuerpos. Durante miles de millones de años, los microbios desarrollaron nuevas formas de interactuar con su

entorno y entre sí. Al hacerlo, se toparon con varias partes moleculares y herramientas para construir cuerpos, aunque los usaron para otros propósitos. También existía una causa para el origen de los cuerpos: hace mil millones de años, los microbios habían aprendido a comerse entre sí.

Había una razón para construir cuerpos, y las herramientas para hacerlo ya estaban ahí.

Algo faltaba. Ese algo era suficiente oxígeno en la tierra para soportar los cuerpos.

Cuando el oxígeno de la tierra aumentó, aparecieron cuerpos por todas partes. La vida nunca sería la misma.

CAPÍTULO OCHO

HACIENDO OLFATOS

A principios de los años 80, hubo tensión entre los biólogos moleculares y las personas que trabajaban en organismos enteros: ecologistas, anatomistas y paleontólogos. Los anatomistas, por ejemplo, eran considerados como pintorescos y anticuados, desesperadamente fascinados por un tipo de ciencia anticuada. La biología molecular estaba revolucionando nuestro enfoque de la anatomía y la biología del desarrol o, tanto que las disciplinas clásicas, como la paleontología, parecían ser callejones sin salida en la historia de la biología. Se me hizo sentir que, debido a mi amor por los fósiles, iba a ser reemplazado por uno de esos nuevos secuenciadores automatizados de ADN.

Veinte años más tarde, todavía estoy cavando en la tierra y agrietando rocas.

También estoy recolectando ADN y viendo su papel en el desarrollo. Los debates suelen comenzar como escenarios o bien. Con el tiempo, las posiciones de todo o nada dan paso a un enfoque más realista. Los fósiles y el registro geológico siguen siendo una fuente muy poderosa de pruebas sobre el pasado; nada más revela los entornos reales y las

estructuras de transición que existieron durante la historia de la vida. Como hemos visto, el ADN es una ventana extraordinariamente poderosa a la historia de la vida y a la formación de cuerpos y órganos. Su papel es particularmente importante donde el registro fósil es silencioso. Grandes partes de los cuerpos - tejidos blandos, por ejemplo

- simplemente no se fosilizan fácilmente. En estos casos, el registro de ADN es prácticamente todo lo que tenemos.

Extraer ADN de los cuerpos es increíblemente fácil, tan fácil que puedes hacerlo en tu cocina. Toma un puñado de tejido de alguna planta o animal- guisantes, o carne, o hígado de pollo. Añade un poco de sal y agua y ponlo todo en una licuadora para triturar el tejido. Luego agregue un poco de jabón para platos. El jabón rompe las membranas que rodean todas las células del tejido que eran demasiado pequeñas para la licuadora.

Después de eso, agregue un poco de ablandador de carne. El ablandador de carne rompe algunas de las proteínas que se adhieren al ADN. Ahora tienes una sopa jabonosa, ablandadora de carne, con ADN en su interior. Finalmente, agrega un poco de alcohol para frotar a la mezcla. Tendrás dos capas de líquido: papilla jabonosa en la parte inferior, alcohol claro en la parte superior. El ADN tiene una verdadera atracción por el alcohol y se moverá dentro de él. Si aparece una bola blanca en el alcohol, habrás hecho todo bien. Ese "goop" es el ADN.

Ahora estás en posición de usar ese globo blanco para entender muchas de las conexiones básicas que tenemos con el resto de la vida. El truco, en el que gastamos incontables horas y dólares, se reduce a comparar la estructura y función del ADN en diferentes especies. Aquí está la parte contra-intuitiva. Al extraer el ADN de *cualquier* tejido, digamos el hígado, de diferentes especies, se puede realmente descifrar la historia de prácticamente cualquier parte de nuestro cuerpo, incluyendo nuestro sentido del olfato. Encerrado dentro de ese ADN, ya sea que venga del hígado, la sangre o el músculo, está gran parte del aparato que usamos para detectar olores en nuestro entorno. Recordemos que todas nuestras células contienen el mismo ADN; lo que difiere es qué bits de ADN están activos. Los genes implicados en el sentido del olfato están presentes en todas nuestras células, aunque sólo están activos en la zona nasal.

Como todos sabemos, los olores provocan impulsos en nuestros cerebros que pueden tener un profundo impacto en la forma en que percibimos nuestro mundo. Un olor puede llevarnos a recordar las aulas de nuestra niñez o la húmeda calidez del ático de nuestros abuelos, cada ocasión trayendo a la superficie sentimientos largamente enterrados. Más esencialmente, los olores pueden ayudarnos a sobrevivir. El olor de la comida sabrosa nos da hambre; el olor de las aguas residuales nos hace sentir enfermos.

Estamos programados para evitar los huevos podridos. ¿Quieres vender tu casa? Sería mucho mejor tener pan cocido en el horno que coles hirviendo en la estufa cuando los posibles compradores se acerquen. Colectivamente invertimos grandes sumas en nuestro sentido del olfato: en 2005 la industria del perfume generó 24.000 millones de dólares de negocio sólo en los Estados Unidos. Todo esto atestigua lo profundamente arraigado que está nuestro sentido del olfato en nuestro interior. También es muy antiguo.

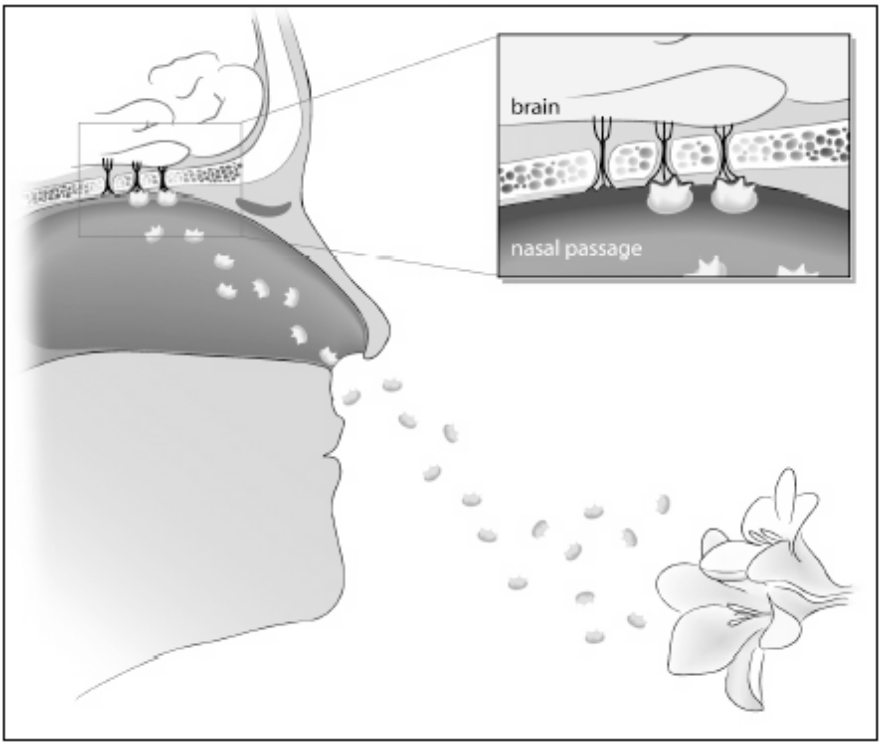
Nuestro sentido del olfato nos permite discriminar entre cinco mil y diez mil olores.

Algunas personas pueden detectar las moléculas de olor en un pimiento verde en una concentración de menos de una parte por trillón. Eso es como sacar un grano de arena de una playa de un kilómetro de largo. ¿Cómo lo hacemos?

Lo que percibimos como un olor es la respuesta de nuestro cerebro a un cóctel de moléculas que flotan en el aire. Las moléculas que finalmente registramos como un olor son diminutas, lo suficientemente ligeras como para estar suspendidas en el aire. A medida que respiramos o inhalamos, aspiramos estas moléculas de olor en nuestras fosas nasales. Desde allí, las moléculas de olor van a un área detrás de nuestra nariz donde son atrapadas por el revestimiento mucoso de nuestras fosas nasales. Dentro de este revestimiento hay un parche de tejido que contiene millones de células nerviosas, cada una con pequeñas proyecciones en la membrana mucosa. Cuando las moléculas en el aire se unen a las células nerviosas, se envían señales a nuestro cerebro. Nuestro cerebro registra estas señales como un olor.

La parte molecular del olfato funciona como un mecanismo de cerradura y l ave. La cerradura es la molécula del olor; la llave es el receptor en la célula nerviosa. Una molécula captada por las

membranas mucosas de nuestra nariz interactúa con un



receptor en la célula nerviosa. Sólo cuando la molécula se une al receptor se envía una señal a nuestro cerebro. Cada receptor está sintonizado a un tipo diferente de molécula, por lo que un olor particular puede involucrar muchas moléculas y, en consecuencia, muchos receptores que envían señales a nuestro cerebro.

La mejor analogía para el olor viene de la música: un acorde. Un acorde se compone de varias notas que actúan juntas como una sola. De la misma manera, un olor es el producto de las señales de muchos receptores conectados a diferentes moléculas de olor. Nuestro cerebro percibe estos diferentes impulsos como un solo olor.

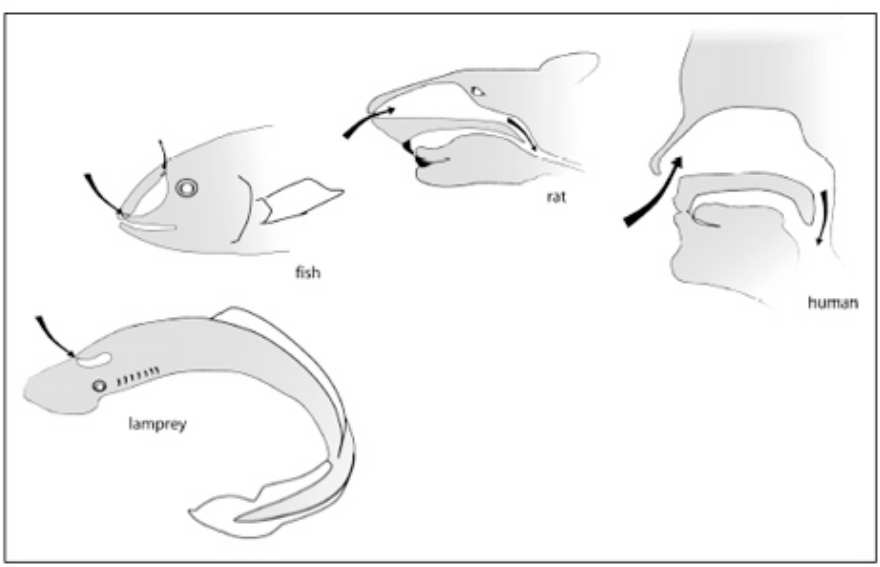
Las moléculas (agrandadas muchas, muchas veces) de una flor flotan en el aire.

Estas moléculas se unen a los receptores dentro del revestimiento de nuestras cavidades nasales. Una vez que las moléculas se unen, se envía una señal a nuestro cerebro. Cada olor está compuesto de

muchas moléculas diferentes que se unen a diferentes receptores. Nuestro cerebro integra estas señales cuando percibimos un olor.

Como en los peces, anfibios, reptiles, mamíferos y aves, gran parte de nuestro sentido del olfato está alojado dentro de nuestro cráneo. Como los otros animales, tenemos uno o más agujeros a través de los cuales llevamos el aire al interior, y luego un conjunto de tejidos especializados donde los químicos del aire pueden interactuar con las neuronas.

Podemos rastrear los patrones de estos agujeros, espacios y membranas desde los peces hasta el hombre y encontrar un patrón general. Los animales vivos más primitivos con cráneo, los peces sin mandíbula como las lampreas y los peces brujos, tienen una sola fosa nasal que conduce a un saco dentro del cráneo. El agua entra en este saco ciego, y es allí donde se produce el olor; la principal diferencia con nosotros es que las lampreas y los peces brujos extraen los olores del agua en lugar de los del aire. Nuestros parientes peces más cercanos tienen una disposición similar a la nuestra: el agua entra en una fosa nasal y finalmente va a una cavidad unida a la boca. Los peces como el pez pulmonado o el *Tiktaalik* tienen dos tipos de fosas nasales: una externa y otra interna. En esto, se parecen mucho a nosotros. Siéntese con la boca cerrada y respire. El aire entra en una fosa nasal externa y viaja a través de sus cavidades nasales



para entrar en la parte posterior de su garganta por los pasajes internos. Nuestros ancestros peces también tenían fosas nasales

internas y externas, y para sorpresa de nadie son los mismos peces que tienen huesos en los brazos y otros rasgos en común con nosotros.

Nuestro sentido del olfato contiene un profundo registro de nuestra historia como peces, anfibios y mamíferos. Un gran avance en la comprensión de esto ocurrió en 1991

cuando Linda Buck y Richard Axel descubrieron la gran familia de genes que nos dan nuestro sentido del olfato.

Aberturas nasales y el flujo de moléculas de olor de los peces sin mandíbula al hombre.

Buck y Axel usaron tres supuestos principales para diseñar sus experimentos.

Primero, llegaron a una hipótesis razonada, basada en el trabajo realizado en otros laboratorios, sobre cómo podrían haber sido los genes que hacen los receptores de olor.

Los experimentos mostraron que los receptores de olor tienen una estructura característica con un número de bucles moleculares que les ayudan a transmitir información a través de una célula. Esta era una gran pista, porque Buck y Axel podían entonces buscar en el genoma de un ratón cada gen que hace esta estructura. En segundo lugar, asumieron que los genes de estos receptores tenían que tener una actividad muy específica - deberían estar activos sólo en los tejidos involucrados con el olor. Esto tiene sentido: si algo está involucrado en el olfato, entonces debería estar restringido a los tejidos especializados para ese propósito. Tercero, y esto último era una gran suposición, Axel y Buck razonaron que no había sólo uno o incluso un pequeño número de estos genes, tenía que haber muchos de ellos. Esta hipótesis se basaba en el hecho de que muchos tipos diferentes de químicos pueden estimular diferentes olores.

Si había una coincidencia de uno a uno entre cada tipo de sustancia química y un receptor o gen especializado en ella, entonces tenía que haber muchos, muchos genes.

Pero, dados los datos que tenían en ese momento, esto no tenía por qué ser cierto.

Las tres suposiciones de Buck y Axel se confirmaron perfectamente. Encontraron genes que tenían la estructura característica del receptor que buscaban. Encontraron que todos estos genes estaban activos sólo en los tejidos implicados en el olor, el epitelio olfativo. Y finalmente, encontraron un gran número de estos genes. Fue un jonrón.

Entonces, Buck y Axel descubrieron algo realmente asombroso: el 3 por ciento de nuestro genoma entero está dedicado a genes para detectar diferentes olores. Cada uno de estos genes crea un receptor para una molécula de olor. Por este trabajo, Buck y Axel compartieron el Premio Nobel en 2004.

Tras el éxito de Buck y Axel, la gente empezó a buscar genes de receptores olfativos en otras especies. Resulta que tales genes son un registro viviente de algunas transiciones importantes en la historia de la vida. Tomemos la transición del agua a la tierra, hace más de 365 millones de años. Hay dos tipos de genes olfativos: uno está especializado en captar olores químicos en el agua, el otro está especializado en el aire.

La reacción química entre la molécula de olor y el receptor es diferente en el agua y el aire, de ahí la necesidad de receptores ligeramente diferentes. Como era de esperar, los peces tienen receptores basados en el agua en sus neuronas nasales, los mamíferos y los reptiles tienen los basados en el aire.

Este descubrimiento nos ayuda a entender el estado de las cosas en los peces más primitivos que viven en el planeta hoy en día, los peces sin mandíbula como las lampreas y los peces brujos. Resulta que estas criaturas tienen, a diferencia de los peces y mamíferos más avanzados, ni genes de "aire" ni de "agua", sino que sus receptores combinan ambos tipos. La implicación es clara: estos peces primitivos surgieron antes de que los genes olfativos se dividieran en dos tipos.

Los peces sin mandíbula revelan otro punto muy importante: tienen un número muy pequeño de genes de olor. Los peces óseos tienen más, y aún más se ven en los anfibios y reptiles. El número de genes de los olores ha aumentado con el tiempo, desde relativamente pocos en criaturas primitivas como los peces sin mandíbula, hasta el enorme número que se ve en los mamíferos. Nosotros los mamíferos, con más de mil de estos genes, dedicamos una gran parte de todo nuestro aparato genético sólo a los olores. Presumiblemente, cuantos más de estos genes tenga un animal, más aguda será su capacidad de discernir

diferentes tipos de olores. Desde este punto de vista, nuestro gran número de genes de los olores tiene sentido - los mamíferos son animales olfativos altamente especializados. Piensa en lo eficaces que pueden ser los perros rastreadores.

¿Pero de dónde vienen todos nuestros genes de olor extra? ¿Acaban de aparecer de la nada? Cómo ocurrió esta expansión parece obvio cuando miramos la estructura de los genes. Si comparamos los genes del olor de un mamífero con el puñado de genes del olor de un pez sin mandíbula, los genes "extra" de los mamíferos son todos variaciones de un tema: parecen copias, aunque modificadas, de los genes de un pez sin mandíbula.

Esto significa que nuestro gran número de genes del olor surgió por muchas rondas de duplicación del pequeño número de genes presentes en las especies primitivas.

Esto nos lleva a una paradoja. Los humanos dedican alrededor del 3 por ciento de nuestro genoma a los genes de los olores, como cualquier otro mamífero. Cuando los genetistas observaron la estructura de los genes humanos con más detalle, se encontraron con una gran sorpresa: trescientos de estos miles de genes se han vuelto

completamente inoperantes por mutaciones que han alterado su estructura de forma irreparable. (Otros mamíferos utilizan estos genes.) ¿Por qué tener tantos genes de olor si tantos de ellos son completamente inútiles?

Los delfines y las ballenas, de todas las criaturas, ofrecen una visión para ayudarnos a responder a esta pregunta. Como todos los mamíferos, los delfines y las ballenas tienen pelo, pechos y un oído medio de tres huesos. Su historia mamífera también está registrada en sus genes olfativos: al carecer de genes especializados en el agua como el pescado, los cetáceos tienen genes mamíferos especializados en el aire. La historia de los mamíferos de ballenas y delfines está incluso escrita en el ADN de su aparato de percepción de olores. Pero hay un rompecabezas interesante: los delfines y las ballenas ya no usan sus conductos nasales para oler. ¿Qué hacen estos genes? El antiguo pasaje nasal ha sido modificado en un orificio de soplado, que se utiliza para respirar, no para oler. Esto ha tenido un efecto notable en los genes olfativos: todos los genes olfativos de un cetáceo están presentes, pero ninguno es funcional.

Lo que ha sucedido con los genes de los olores de los delfines y las ballenas también sucede en los genes de muchas otras especies. Las mutaciones aparecen en los genomas de generación en generación. Si una mutación anula la función de un gen, el resultado puede ser peligroso, o incluso letal. ¿Pero qué sucede si una mutación anula la función de un gen que no hace nada? Hay mucha teoría matemática que dice lo obvio: tales mutaciones se transmitirán silenciosamente de generación en generación. Esto es exactamente lo que parece haber sucedido en los delfines. Sus genes olfativos ya no son necesarios, dado el orificio de soplado, así que las mutaciones que anularon su función se acumulan con el tiempo. Los genes no tienen uso, pero permanecen presentes en el ADN como registros silenciosos de la evolución.

Pero los humanos tienen sentido del olfato, así que, ¿por qué se han eliminado tantos de nuestros genes del olor? Yoav Gilad y sus colegas respondieron a esta pregunta comparando genes entre diferentes primates. Descubrió que los primates que desarrollan visión de color tienden a tener un gran número de genes del olfato noqueados. La conclusión es clara. Los humanos somos parte de un linaje que ha cambiado el olor por la vista. Ahora dependemos más de la visión que del olfato, y esto se refleja en nuestro genoma. En este intercambio, nuestro sentido del olfato se ha desatendido, y muchos de nuestros genes olfativos se han vuelto inoperantes.

Llevamos mucho equipaje en nuestras narices, o, más precisamente, en el ADN que controla nuestro sentido del olfato. Nuestros cientos de genes olfativos inútiles son restos de los antepasados de los mamíferos que dependían más del sentido del olfato para sobrevivir. De hecho, podemos hacer estas comparaciones aún más profundas. Al igual que las fotocopias que pierden su fidelidad al ser copiadas repetidamente, nuestros genes olfativos se vuelven más disímiles al compararnos con criaturas sucesivamente más primitivas. Nuestros genes son similares a los de los primates, menos parecidos a los de otros mamíferos, menos parecidos aún a los de los reptiles, anfibios, peces, etc. Ese equipaje es un testigo silencioso de nuestro pasado; dentro de nuestras narices hay un verdadero árbol de la vida.

CAPÍTULO NUEVO

VISIÓN

Sólo una vez en toda mi carrera he encontrado el ojo de una criatura fósil. No estaba en el campo en una expedición, estaba en la trastienda de una tienda de minerales en un pequeño pueblo del noreste de China. Mi colega Gao Keqin y yo estábamos estudiando las primeras salamandras conocidas, hermosos fósiles recogidos de rocas chinas de unos 160 millones de años de antigüedad. Acabábamos de terminar un viaje de recolección a algunos sitios que Gao conocía. Los lugares eran secretos, porque estos fósiles de salamandras tienen un gran valor monetario para los granjeros que típicamente los encuentran. Lo que los hace especiales es que las impresiones de los tejidos blandos, como las branquias, las tripas y el notocordio, a menudo se conservan.

Los coleccionistas privados los adoran porque los fósiles de esta calidad son extremadamente raros. Para cuando terminamos en la tienda de minerales, Gao y yo ya habíamos coleccionado un número de antiguas salamandras realmente hermosas de sus sitios.

Este particular comerciante de minerales había puesto sus manos en uno de los mejores fósiles de salamandra de todos los tiempos. Gao quería que lo viéramos y pasó la mayor parte del día tratando de trabajar en el trato. Toda la visita tuvo una sensación terriblemente ilícita. Gao pasó varias horas fumando cigarrillos con el caballero, hablando y gesticulando en chino. Claramente había algún trueque, pero al no saber chino no tenía ni idea de las ofertas que se ponían sobre la mesa. Después de muchos apretones de cabeza y finalmente un gran apretón de manos, se me permitió ir a la trastienda y mirar un fósil en el escritorio del comerciante. Era un espectáculo impresionante: el cuerpo de una salamandra larval, de no más de tres pulgadas de largo.

En él, pude ver impresiones de todo el animal, hasta las pequeñas conchas que comió como su última comida. Y, por primera y única vez en mi carrera, miraba fijamente el ojo de un antiguo animal fósil.

Los ojos raramente entran en el registro fósil. Como hemos visto, los mejores candidatos para la preservación como fósiles son las partes duras de los animales: huesos, dientes y escamas. Si queremos entender la historia de los ojos, entonces podemos usar un hecho importante a nuestro favor. Hay una notable diversidad de órganos y tejidos que los animales utilizan para captar la luz, desde los simples órganos fotorreceptores en los animales invertebrados hasta los ojos

compuestos de varios insectos y nuestro propio ojo tipo cámara. ¿Cómo utilizamos esta variación para comprender cómo se desarrolló nuestra capacidad de ver a lo largo del tiempo?

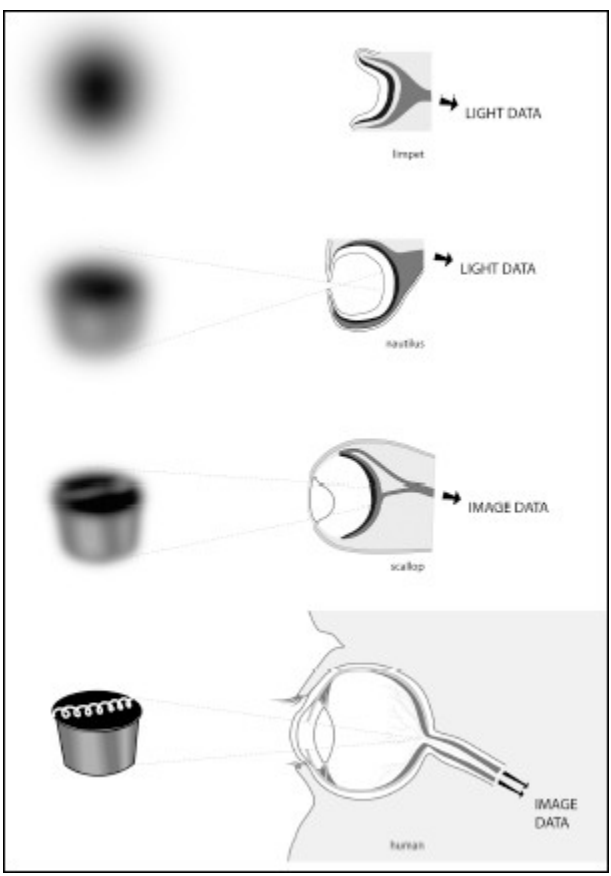
La historia de nuestros ojos se parece mucho a la de un coche. Tomemos un Chevy Corvette, por ejemplo. Podemos rastrear la historia del modelo en su conjunto, el Corvette, y la historia de cada una de sus partes. El 'Vette tiene una historia, comenzando con sus orígenes en 1953 y continuando a través de los diferentes diseños de modelos cada año. Los neumáticos usados en la 'Vette también tienen una historia, al igual que el caucho usado en su fabricación. Esto proporciona una gran analogía para los cuerpos y órganos. Nuestros ojos tienen una historia como órganos, pero también las partes constituyentes de los ojos, las células y los tejidos, y también los genes que hacen esas partes. Una vez que identificamos estas múltiples capas de historia en nuestros órganos, entendemos que somos simplemente un mosaico de trozos y piezas que se encuentran en prácticamente todo lo demás del planeta.

Gran parte del procesamiento de las imágenes que vemos ocurre en realidad dentro de nuestros cerebros: el papel del ojo es capturar la luz de manera que pueda ser llevada al cerebro para ser procesada como una imagen. Nuestros ojos, como los de toda criatura con cráneo y columna vertebral, son como pequeñas cámaras. Después de que la luz del exterior entra en el ojo, se enfoca en una pantalla en la parte posterior del globo ocular. La luz viaja a través de varias capas a medida que atraviesa este camino.

Primero pasa a través de la córnea, una fina capa de tejido transparente que cubre el lente. La cantidad de luz que entra en el ojo es controlada por un diafragma, llamado iris, que se dilata y contrae por la acción de los músculos involuntarios. La luz pasa entonces a través del lente, que, como una cámara, enfoca la imagen. Pequeños músculos rodean el lente; a medida que estos músculos se contraen, cambian la forma del lente, enfocando así las imágenes de cerca y de lejos. Una lente sana es clara y está hecha de proteínas especiales que le dan su forma distintiva y sus propiedades de captación de luz. Estas proteínas, conocidas como cristalinas del cristalino, son excepcionalmente longevas, permitiendo que el lente continúe funcionando a medida que envejecemos. La pantalla sobre la que se proyecta toda la luz, la retina, está cargada de vasos sanguíneos y receptores de luz. Estos receptores de luz envían señales a nuestro cerebro que luego interpretamos como imágenes. La retina absorbe la luz a través de células sensibles que recogen la luz. Hay dos tipos de

estas células: una es muy sensible a la luz, la otra lo es menos. Las células más sensibles registran sólo en blanco y negro; las menos sensibles registran en color. Si miramos alrededor del mundo animal, podemos evaluar si los animales están especializados para la luz del día o de la noche mirando los porcentajes de cada tipo de célula sensora de luz en sus ojos. En los humanos estas células constituyen alrededor del 70 por ciento de todas las células sensoriales de nuestro cuerpo. Esta es una clara afirmación sobre lo importante que es la visión para nosotros.

Nuestro ojo de cámara es común a todas las criaturas con cráneo, desde peces hasta mamíferos. En otros grupos de animales encontramos diferentes ojos, que van desde simples parches de células especializadas para detectar la luz, a ojos con lentes compuestos como los que se encuentran en las moscas, a versiones primordiales de nuestro propio ojo. La clave para entender la historia de nuestros ojos es entender la relación entre las estructuras que hacen nuestro ojo de cámara y las que hacen todos



los otros tipos de ojos. Para ello, estudiaremos las moléculas que recogen la luz, los tejidos que usamos para ver y los genes que lo hacen todo.

Los ojos se enfocan: desde los primitivos dispositivos de captación de luz en los invertebrados hasta nuestro ojo de cámara con lente. A medida que los ojos evolucionan, la agudeza visual aumenta.

MOLÉCULAS QUE RECOGEN LA LUZ

El trabajo realmente importante en las células de recolección de luz ocurre dentro de la molécula que realmente recoge la luz. Cuando esta molécula absorbe la luz, cambia de forma y se divide en dos partes. Una parte se deriva de la vitamina A, la otra de una proteína conocida como opsina. Cuando la opsina se rompe, inicia una reacción en cadena que lleva a una neurona a enviar un impulso a nuestro cerebro. Usamos diferentes opsinas para ver en blanco y negro y en color. Así como una impresora de inyección de tinta necesita tres o cuatro tintas para imprimir en color, necesitamos tres moléculas de luz para ver en color. Para la visión en blanco y negro, usamos sólo una.

Estas moléculas que recogen la luz cambian de forma con la luz, luego se recargan en la oscuridad y vuelven a su estado normal. El proceso toma unos pocos minutos. Todos sabemos esto por experiencia personal: al pasar de un lugar bril ante a una habitación oscura es virtualmente imposible ver objetos débiles. La razón es que las moléculas que recogen la luz necesitan tiempo para recargarse. Después de unos minutos, la visión en la oscuridad regresa.

A pesar de la impresionante variedad de órganos fotorreceptores, todos los animales utilizan el mismo tipo de molécula captadora de luz para hacer este trabajo. Los

insectos, los humanos, las almejas y las vieiras usan opsinas. No sólo podemos rastrear la historia de los ojos a través de las diferencias en la estructura de sus opsinas, sino que tenemos una buena evidencia de

que podemos agradecer a las bacterias por estas moléculas en primer lugar.

Esencialmente, una opsina es un tipo de molécula que transmite información del exterior de una célula al interior. Para lograr esta hazaña, necesita llevar una sustancia química a través de la membrana que rodea a la célula. Las opsinas utilizan un tipo de conductor especializado que toma una serie de curvas y bucles mientras viaja desde el exterior al interior de la célula. Pero este camino retorcido que el receptor toma a través de la membrana celular no es aleatorio, tiene una firma característica. ¿Dónde más se ve este camino retorcido? Es idéntico a partes de ciertas moléculas en las bacterias. Las muy precisas similitudes moleculares en esta molécula sugieren una propiedad muy antigua de todos los animales que se extiende hasta nuestra historia compartida con las bacterias. En cierto sentido, trozos modificados de antiguas bacterias se encuentran dentro de nuestras retinas, ayudándonos a ver.

Incluso podemos rastrear algunos eventos importantes en la historia de nuestros ojos examinando las opsinas en diferentes animales. Tomemos uno de los principales acontecimientos en nuestro pasado de primates, el desarrollo de la visión de colores.

Recordemos que los humanos y nuestros parientes simios más cercanos, los monos del Viejo Mundo, tienen un tipo de visión en color muy detallada que se basa en tres tipos diferentes de receptores de luz. Cada uno de estos receptores está sintonizado con un tipo diferente de luz. La mayoría de los otros mamíferos sólo tienen dos tipos de receptores y por lo tanto no pueden discriminar tantos colores como nosotros. Resulta que podemos rastrear el origen de nuestra visión del color mirando los genes que producen los receptores. Los dos tipos de receptores que tienen la mayoría de los mamíferos están hechos por dos tipos de genes. De nuestros tres genes que producen receptores, dos son notablemente similares a los de otros mamíferos. Esto parece implicar que nuestra visión en color comenzó cuando uno de los genes de otros mamíferos se duplicó y las copias se especializaron con el tiempo para diferentes fuentes de luz. Como recordarán, algo similar ocurrió con los genes receptores de olor.

Este cambio puede estar relacionado con los cambios en la flora de la Tierra hace millones de años. Ayuda pensar para qué era probablemente buena la visión de color cuando apareció por primera

vez. Los monos que viven en los árboles se beneficiarían porque la visión cromática les permitía discriminar mejor entre muchos tipos de frutas y hojas y seleccionar las más nutritivas. A partir del estudio de los otros primates que tienen visión en color, podemos estimar que nuestro tipo de visión en color surgió hace unos 55 millones de años. En este momento encontramos evidencia fósil de cambios en la composición de los bosques antiguos. Antes de esta época, los bosques eran ricos en higos y palmeras, que son sabrosos pero todos del mismo color general. Los bosques posteriores tenían más diversidad de plantas, probablemente con diferentes colores.

Parece una buena apuesta que el cambio a la visión del color se correlaciona con el

_____

_____

cambio de un bosque monocromático a uno con una paleta de colores más rica en alimentos.

TISSUES

Los ojos de los animales tienen dos sabores: uno se ve en los invertebrados, el otro en los vertebrados, como los peces y los humanos. La idea central es que hay dos formas diferentes de aumentar la superficie de captación de luz en el tejido ocular. Los invertebrados, como las moscas y los gusanos, logran esto teniendo numerosos pliegues en el tejido, mientras que nuestro linaje expande el área de superficie teniendo muchas pequeñas proyecciones que se extienden desde el tejido como pequeñas cerdas. Un montón de otras diferencias también se relacionan con estos diferentes tipos de diseños. A falta de fósiles en la fase relevante de la historia, parecería que nunca seríamos capaces de superar las diferencias entre nuestros ojos y los de los invertebrados. Esto es, hasta 2001, cuando Detlev Arendt pensó en estudiar los ojos de un pequeño gusano muy primitivo.

Los poliquetos están entre los gusanos vivos más primitivos que se conocen. Tienen un plan corporal segmentado muy simple, y también tienen dos tipos de órganos sensibles a la luz: un ojo y, enterrado bajo su piel, una parte de su sistema nervioso que se especializa en captar la luz. Arendt separó estos gusanos tanto física como genéticamente. El conocimiento de la secuencia genética de nuestros genes de opsina

y la estructura de nuestras neuronas de captación de luz le dio a Arendt las herramientas para estudiar cómo se hacen los poliquetos. Descubrió que tenían elementos de ambos tipos de fotorreceptores animales. El "ojo" normal estaba compuesto de neuronas y opsinas como el ojo de cualquier invertebrado. Los diminutos fotorreceptores bajo la piel eran otra cosa. Tenían opsinas "vertebradas" y estructura celular incluso con las pequeñas proyecciones de cerdas, pero en forma primitiva. Arendt había encontrado un puente viviente, un animal con ambos tipos de ojos, uno de los cuales, el nuestro, existía en una forma muy primitiva. Cuando miramos a los invertebrados primitivos, encontramos que los diferentes tipos de ojos de los animales comparten partes comunes.

GENES

El descubrimiento de Arendt lleva a otra pregunta. Una cosa es que los ojos compartan partes comunes, pero ¿cómo pueden estar estrechamente relacionados unos ojos que

parecen tan diferentes, como los de los gusanos, las moscas y los ratones? Para la respuesta, consideremos la receta genética que construye los ojos.

A principios del siglo XX, Mildred Hoge estaba registrando mutaciones en las moscas de la fruta cuando encontró una mosca que no tenía ningún tipo de ojos. Este mutante no era un caso aislado, y Hoge descubrió que podía criar toda una línea de estas moscas, a las que llamó " *sin ojos".* Más tarde, se descubrió una mutación similar en ratones.

Algunos individuos tenían ojos pequeños; otros carecían de porciones enteras de la cabeza y la cara, incluyendo los ojos. Una condición similar en los humanos se conoce como aniridia; los individuos afectados carecen de grandes porciones de sus ojos. En estas criaturas muy diferentes - moscas, ratones y humanos - los genetistas encontraron tipos similares de mutantes.

A principios de los años noventa se produjo un gran avance, cuando los laboratorios aplicaron nuevas técnicas moleculares para comprender cómo los mutantes sin ojos afectaban al desarrol o de los ojos. Mapeando los genes, fueron capaces de localizar los trozos de ADN responsables de las mutaciones. Cuando se secuenció el ADN,

resultó que los genes de la mosca, el ratón y el humano responsables de la falta de ojos tenían estructuras y secuencias de ADN similares. En un sentido muy real, son el mismo gen.

¿Qué aprendimos de esto? Los científicos habían identificado un solo gen que, al mutar, producía criaturas con ojos pequeños o sin ojos. Esto significaba que la versión normal del gen era un importante desencadenante de la formación de los ojos. Ahora llegó la oportunidad de hacer experimentos para hacer otro tipo de preguntas. ¿Qué sucede cuando nos metemos con el gen, encendiéndolo y apagándolo en los lugares equivocados?

Las moscas eran un tema ideal para este trabajo. Durante la década de 1980, se desarrollaron varias herramientas genéticas muy poderosas a través del trabajo con las moscas. Si se conociera un gen, o una secuencia de ADN, se podría hacer una mosca sin el gen o, al contrario, una mosca con el gen activo en los lugares equivocados.

Usando estas herramientas, Walter Gehring comenzó a jugar con el gen *sin ojos*. El equipo de Gehring fue capaz de hacer que el ADN *sin ojos se activara en* cualquier lugar que quisieran: en la antena, en las patas, en las alas. Cuando su equipo hizo esto, encontraron algo impresionante. Si activaban el gen *sin ojos* en la antena, crecía un ojo allí. Si activaban el gen *sin ojos* en un segmento del cuerpo, un ojo se desarrol aba allí.

En cualquier lugar donde activaran el gen, tendrían un nuevo ojo. Para colmo, algunos de los ojos mal colocados mostraban una capacidad incipiente de responder a la luz.

Gehring había descubierto un importante desencadenante en la formación de los ojos.

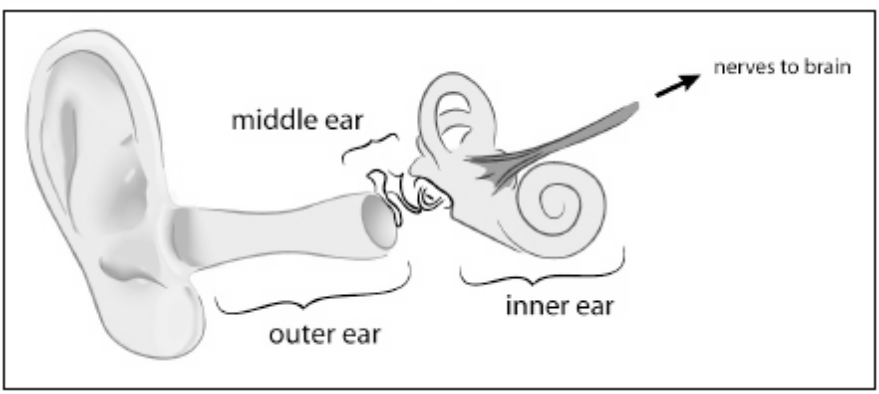
Gehring no se detuvo ahí; comenzó a intercambiar genes entre especies. Tomaron el equivalente de ratón *sin ojos, Pax 6,* y lo encendieron en una mosca. El gen del ratón produjo un nuevo ojo. Y no un ojo cualquiera, un ojo de mosca. El laboratorio de Gehring encontró que podían usar el gen del *ratón* para desencadenar la formación de un ojo extra *de mosca* en cualquier lugar: en la espalda, en un ala, cerca de la boca. Lo que

Gehring había encontrado era un interruptor maestro para el

desarrollo del ojo que era prácticamente el mismo en un ratón y una mosca. Este gen, *Pax 6,* inició una compleja reacción en cadena de actividad genética que finalmente condujo a un nuevo ojo de mosca.

Ahora sabemos que el *sin-ojos,* o *Pax 6,* controla el desarrollo en todo lo que tiene ojos. Los ojos pueden parecer diferentes -algunos con un lente, otros sin él; algunos compuestos, otros simples- pero los interruptores genéticos que los hacen son los mismos.

Cuando te miras a los ojos, olvídate del romance, de la creación y de las ventanas del alma. Con sus moléculas, genes y tejidos derivados de microbios, medusas, gusanos y moscas, ves toda una colección de animales salvajes.



CAPÍTULO DIEZ

EARS

La primera vez que ves el interior de la oreja es una decepción: la verdadera maquinaria está escondida en lo profundo del cráneo, encerrada en una pared de hueso. Una vez que abres el cráneo y sacas el cerebro, tienes que astillar con un cincel para quitar esa pared. Si eres realmente bueno, o muy afortunado, harás el golpe correcto y lo verás: el oído interno. Se parece al tipo de caparazón de caracol enrollado que encuentras en la suciedad de tu césped.

La oreja puede no parecer mucho, pero es un maravilloso artilugio de Rube Goldberg.

Cuando oímos, las ondas sonoras se canalizan hacia la solapa exterior, el oído externo.

Las ondas sonoras entran en el oído y hacen que el tímpano traquetee. El tímpano está unido a tres pequeños huesos, que se agitan junto con él. Uno de estos huesos del oído está unido a la estructura del caracol por una especie de émbolo. La sacudida del hueso del oído hace que el émbolo suba y baje. Esto hace que se mueva algo de gel dentro del caparazón del caracol. El gel agitado dobla los nervios, que envían una señal al cerebro, que lo interpreta como un sonido. La próxima vez que estés en un concierto, imagínate todas las cosas volando en tu cabeza.

Esta estructura nos permite distinguir tres partes del oído: externa, media e interna.

El oído externo es la parte visible. El medio contiene los pequeños huesos del oído. Por último, el oído interno está formado por los nervios, el gel y los tejidos que los rodean.

Estos tres componentes de los oídos nos permiten estructurar nuestra discusión de una manera muy conveniente.

De las tres partes de nuestro oído, el externo, el medio y el interno, el oído interno es el más antiguo y la parte que controla los impulsos nerviosos enviados al cerebro.

La parte de la oreja que podemos ver, la solapa en la que colgamos las gafas, es una adición evolutiva relativamente nueva en los cuerpos. Confirma esto en tu próximo

---

viaje al acuario o al zoológico. ¿Cuántos tiburones, peces óseos, anfibios y reptiles tienen orejas externas? El pabellón auricular, la aleta de la oreja externa, se encuentra sólo en los mamíferos. Algunos anfibios y reptiles tienen orejas externas visibles, pero no tienen pabellón auricular. A menudo el oído externo es sólo una membrana que parece la parte superior de un tambor.

La elegancia de nuestra conexión con los tiburones y los peces óseos se revela cuando miramos dentro de nuestros oídos. Las orejas pueden parecer un lugar poco probable para una conexión entre humanos y tiburones, especialmente porque los tiburones no tienen orejas. Pero la conexión está ahí. Empecemos con los huesos de las orejas.

EL OÍDO MEDIO, LOS TRES HUESOS DEL OÍDO

Los mamíferos son muy especiales. Con pelo y glándulas productoras de leche, podemos distinguirnos fácilmente de otras criaturas. A la mayoría de la gente le sorprende saber que algunos de los rasgos más distintivos de los mamíferos se encuentran dentro del oído. Los huesos del oído medio de los mamíferos son como los de ningún otro animal: los mamíferos tienen tres huesos, mientras que los reptiles y los anfibios sólo tienen uno. Los peces no tienen ninguno. ¿De dónde provienen nuestros huesos del oído medio?

Algo de anatomía: recuerden que nuestros tres huesos del oído medio se conocen como el martillo, el yunque y el estribo. Como hemos visto, cada uno de estos huesos del oído se deriva de los arcos branquiales: el estribo del primer arco, y el martillo y el yunque del segundo arco. Es aquí donde comienza nuestra historia.

En 1837, el anatomista alemán Karl Reichert estaba observando embriones de mamíferos y reptiles para entender cómo se forma el cráneo. Siguió los arcos branquiales de diferentes especies para entender donde terminaban en los diferentes cráneos. Mientras hacía esto una y otra vez, encontró algo que parecía no tener ningún sentido: dos de los huesos de las orejas de los mamíferos correspondían a piezas de la mandíbula de los reptiles. Reichert no podía creer lo que veía, y su monografía revela su excitación. Al describir la comparación oreja-mandíbula, su prosa se aparta de la descripción normalmente sobria de la anatomía del siglo XIX para expresar la conmoción, incluso el asombro, ante este descubrimiento. La conclusión era ineludible: el mismo arco branquial que formaba parte de la mandíbula de un reptil formaba los huesos del oído en los mamíferos. Reichert propuso la noción de que incluso él apenas podía creer que las partes de las orejas de los mamíferos son lo mismo que las mandíbulas de los reptiles. Las cosas se ponen más difíciles cuando nos damos cuenta de que Reichert propuso esto varias décadas antes

de que Darwin propusiera su noción

de un árbol genealógico para toda la vida. ¿Qué significa llamar a las estructuras de dos especies diferentes "lo mismo" sin una noción de evolución?

Mucho más tarde, en 1910 y 1912, el anatomista alemán Ernst Gaupp retomó el trabajo de Reichert y publicó un estudio exhaustivo sobre la embriología de los oídos de los mamíferos. Gaupp proporcionó más detalles y, dada la época, interpretó la obra de Reichert en un marco evolutivo. La historia de Gaupp era así: los tres huesos del oído medio revelan el vínculo entre los reptiles y los mamíferos. El único hueso del oído medio de los reptiles es el mismo que el estribo de los mamíferos; ambos son derivados del segundo arco. La información explosiva, sin embargo, fue que los otros dos huesos del oído medio de los mamíferos - el martillo y el yunque - evolucionaron a partir de huesos situados en la parte posterior de la mandíbula del reptil. Si este era realmente el caso, entonces el registro fósil debería mostrar huesos que se desplazaron de la mandíbula a la oreja durante el origen de los mamíferos. El problema era que Gaupp trabajaba sólo con criaturas vivas y no apreciaba completamente el papel que los fósiles podían jugar en su teoría.

A partir de la década de 1840, un número de nuevos tipos de criaturas fósiles se dieron a conocer a partir de los descubrimientos en Sudáfrica y Rusia. A menudo, se desenterraban esqueletos enteros de animales del tamaño de un perro, que se conservaban en abundancia. A medida que fueron descubiertos, muchos de ellos fueron embalados y enviados a Richard Owen en Londres para su identificación y análisis. A Owen le llamó la atención que estas criaturas tenían una mezcla de características.

Partes de su esqueleto parecían reptiles. Otras partes, en particular sus dientes, parecían mamíferos. Y estos no fueron hallazgos aislados. Resulta que estos "reptiles parecidos a mamíferos" eran los esqueletos más comunes descubiertos en muchos yacimientos fósiles. No sólo eran muy comunes, sino que había muchos tipos. En los años posteriores a Owen, estos reptiles parecidos a los mamíferos se conocieron en otras partes del mundo y en diferentes períodos de tiempo de la historia de la Tierra.

Formaron una hermosa serie de transición en el registro fósil entre reptil y mamífero.

Hasta 1913, los embriólogos y paleontólogos trabajaban aislados unos de otros. En esta época, el paleontólogo americano W. K. Gregory, del Museo Americano de Historia Natural, vio un importante vínculo entre los embriones de Gaupp y los fósiles africanos.

El más reptil de los reptiles parecidos a los mamíferos tenía un solo hueso en su oído medio; como otros reptiles, tenía una mandíbula compuesta de muchos huesos. Algo notable se reveló cuando Gregory miró a los reptiles mamíferos sucesivamente, algo que habría dejado a Reichert en el suelo si hubiera estado vivo: un continuo de formas que mostraban sin duda que con el tiempo los huesos de la parte posterior de la mandíbula del reptil se hacían cada vez más pequeños, hasta que finalmente se encontraban en el oído medio de los mamíferos. El martil o y el yunque evolucionaron de hecho a partir de las mandíbulas. Lo que Reichert y Gaupp observaron en los embriones estuvo enterrado en el registro fósil todo el tiempo, esperando ser descubierto.

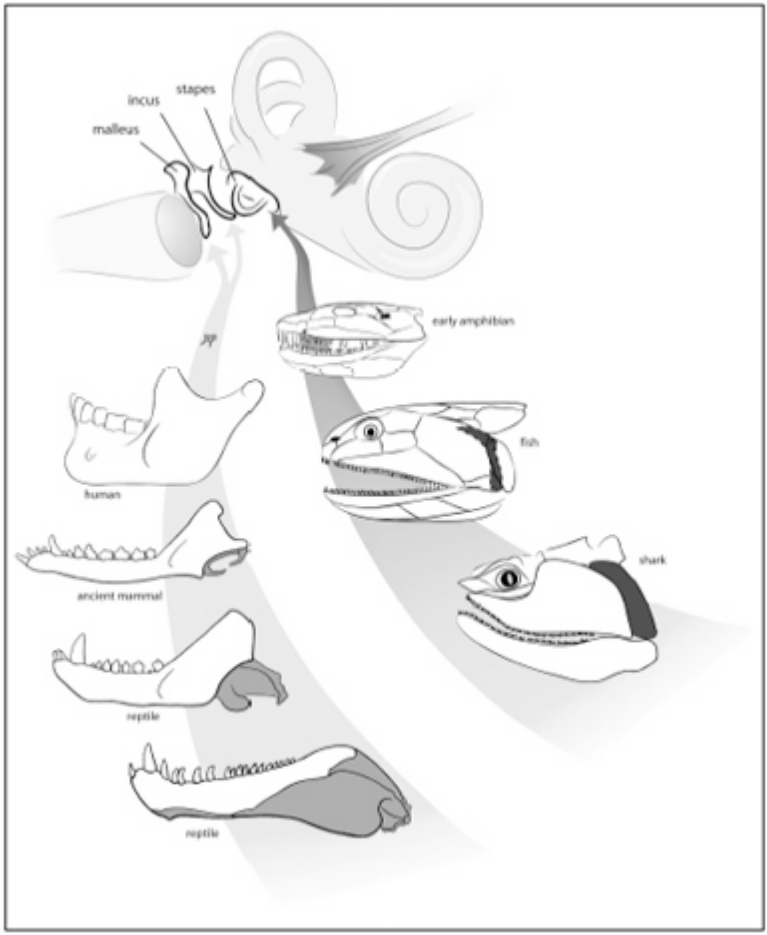
¿Por qué los mamíferos necesitan un oído medio de tres huesos? Esta pequeña conexión forma un sistema de palanca que permite a los mamíferos oír sonidos de mayor frecuencia que los animales con un solo hueso en el oído medio. El origen de los mamíferos implicó no sólo nuevos patrones de masticación, como vimos en el capítulo 4, sino nuevas formas de audición. De hecho, este cambio se logró no mediante la evolución de nuevos huesos per se, sino mediante la readaptación de los existentes. Los huesos utilizados originalmente por los reptiles para masticar evolucionaron en los mamíferos para ayudar a la audición.

Demasiado para el martillo y el yunque. ¿De dónde viene el estribo?

Si simplemente te mostrara un humano adulto y un tiburón, nunca adivinarías que este pequeño hueso en lo profundo del oído de un humano es lo mismo que una gran vara en la mandíbula superior de un pez. Sin embargo, desde el punto de vista del desarrollo, estos huesos son la misma cosa. El estribo es un hueso de la segunda arcada, al igual que el hueso correspondiente en un tiburón y un pez, el hyomandibula. Pero la hiomóndula no es un hueso de la oreja; recuerden que los peces y los tiburones no tienen orejas. En nuestros primos acuáticos, este hueso es una gran vara que conecta la mandíbula superior con la caja cerebral. A pesar de las aparentes diferencias en la función y la forma de estos huesos, las similitudes entre la hiomóndula y el estribo se extienden incluso a los nervios que

los suministran. El nervio clave para el funcionamiento de ambos huesos es el nervio de la segunda arcada, el nervio facial. Por lo tanto, tenemos una situación en la que dos huesos muy diferentes tienen orígenes de desarrollo y patrones de inervación similares. ¿Hay una explicación para esto?

De nuevo, miramos a los fósiles. A medida que rastreamos la hyomandibula de los tiburones a criaturas como *Tiktaalik* a los anfibios, podemos ver cómo se hace más y más pequeña, en última instancia, cambiando de posición desde la mandíbula superior para desempeñar un papel en la audición. El nombre también cambia. Cuando es grande y sostiene la mandíbula, la llamamos hyomandibula; cuando es pequeña y funciona en el oído, se conoce como estribo. Este cambio ocurrió cuando los descendientes de los peces comenzaron a caminar por la tierra. El oído en el agua es diferente al oído en la tierra, y el pequeño tamaño y posición del estribo lo hace ideal para captar las vibraciones en el aire. La nueva habilidad surgió al modificar la mandíbula superior de un pez.



Podemos rastrear los huesos desde los arcos branquiales hasta nuestras orejas, primero durante la transición de pez a anfibio (derecha), y más tarde durante el cambio de reptil a mamífero (izquierda).

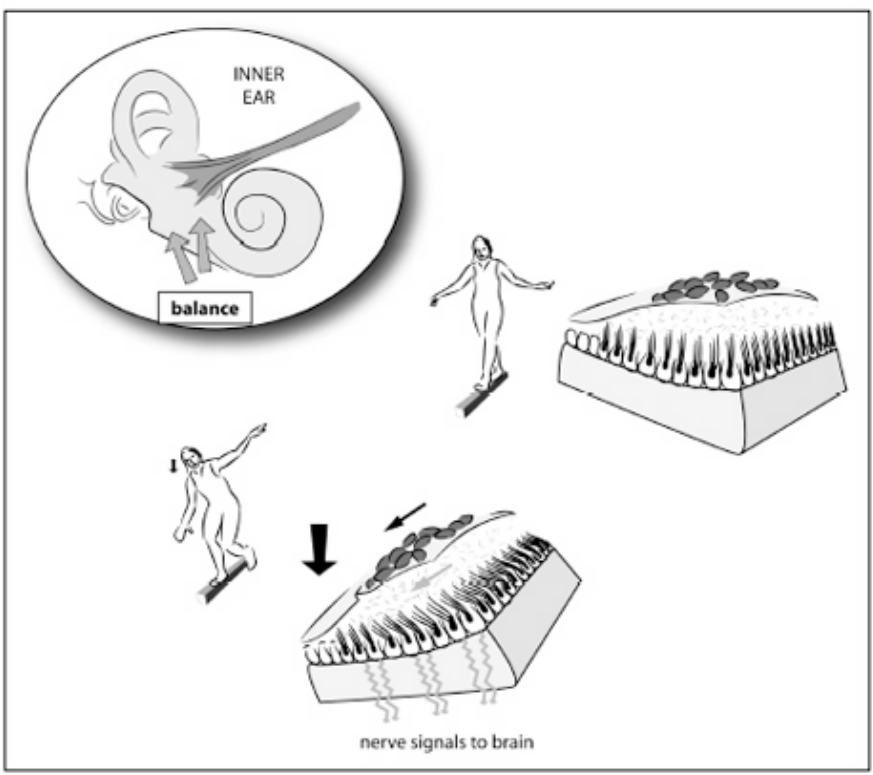
Nuestro oído medio contiene un registro de dos de las grandes transformaciones en la historia de la vida. El origen de nuestro estribo, y su transformación de un hueso de soporte de la mandíbula a un hueso del oído, comenzó cuando los peces comenzaron a caminar por la tierra. El otro gran evento tuvo lugar durante el origen de los mamíferos, cuando los huesos de la mandíbula de un reptil se convirtieron en nuestro martillo e yunque.

Ahora vayamos más adentro del oído, al oído interno.

LOS GELES DEL OÍDO INTERNO SE MUEVEN Y LOS PELOS SE DOBLAN

Muévete por el oído externo, ve más adentro, pasa el tímpano y los tres huesos del oído medio, y terminas en lo profundo del cráneo. Aquí encontrarás los tubos del oído interno y algunos sacos llenos de gel. En los humanos, como en otros mamíferos, los tubos óseos toman la forma de concha de caracol que es tan llamativamente aparente en el laboratorio de anatomía.

El oído interno tiene diferentes partes dedicadas a diferentes funciones. Una parte se utiliza para oír, otra para decirnos en qué dirección está inclinada nuestra cabeza, y otra para registrar la velocidad a la que nuestra cabeza se acelera o se detiene. Al l evar a



cabo cada una de estas funciones, el oído interno funciona más o

menos de la misma manera.

Las diversas partes del oído interno están l enas de un gel que puede moverse. Las células nerviosas especializadas envían proyecciones similares al pelo a este gel.

Cuando el gel se mueve, los pelos de los extremos de las células nerviosas se doblan.

Cuando estos pelos se doblan, las células nerviosas envían un impulso eléctrico al cerebro, donde se registra como sonido, posición o aceleración.

Cada vez que inclinas la cabeza, las pequeñas rocas de los sacos llenos de líquido se mueven. Al hacerlo, doblan las terminaciones nerviosas dentro de los sacos y causan un impulso que se envía a tu cerebro diciendo "Tu cabeza está inclinada".

Para imaginar la estructura que nos dice dónde está nuestra cabeza en el espacio, imagina una bola de nieve de la Estatua de la Libertad. La bola de nieve está hecha de plástico y llena de gel. Cuando lo agitas, el gel se mueve y la "nieve" cae sobre la Estatua de la Libertad. Ahora imagina una bola de nieve hecha de una membrana flexible.

Recójala e inclínela, y todo el conjunto caerá, haciendo que el gel del interior se mueva.

Esto, en una escala mucho más pequeña, es lo que tenemos dentro de nuestros oídos.

Cuando doblamos la cabeza, estos artilugios se mueven, causando la habitual cadena de eventos: el gel del interior se mueve, las proyecciones de pelo de los nervios se doblan, y un impulso es enviado de vuelta a nuestro cerebro.

En nosotros, todo este sistema se hace aún más sensible por la presencia de diminutas estructuras parecidas a rocas en la parte superior de la membrana. A medida que doblamos la cabeza, las rocas acentúan la caída de la membrana, haciendo que el gel se mueva aún más. Esto aumenta la sensibilidad del sistema, permitiéndonos percibir pequeñas diferencias de posición. Incline su cabeza, y las pequeñas rocas dentro de su cráneo se mueven.

Probablemente puedes imaginar lo difícil que sería vivir en el espacio exterior.

Nuestros sensores están sintonizados para trabajar en la gravedad de la Tierra, no en

una cápsula espacial sin gravedad. Flotando alrededor, nuestros ojos registrando una versión de arriba y abajo, nuestros sensores del oído interno totalmente confundidos, es demasiado fácil enfermarse. La enfermedad espacial ha sido un verdadero problema por estas mismas razones.

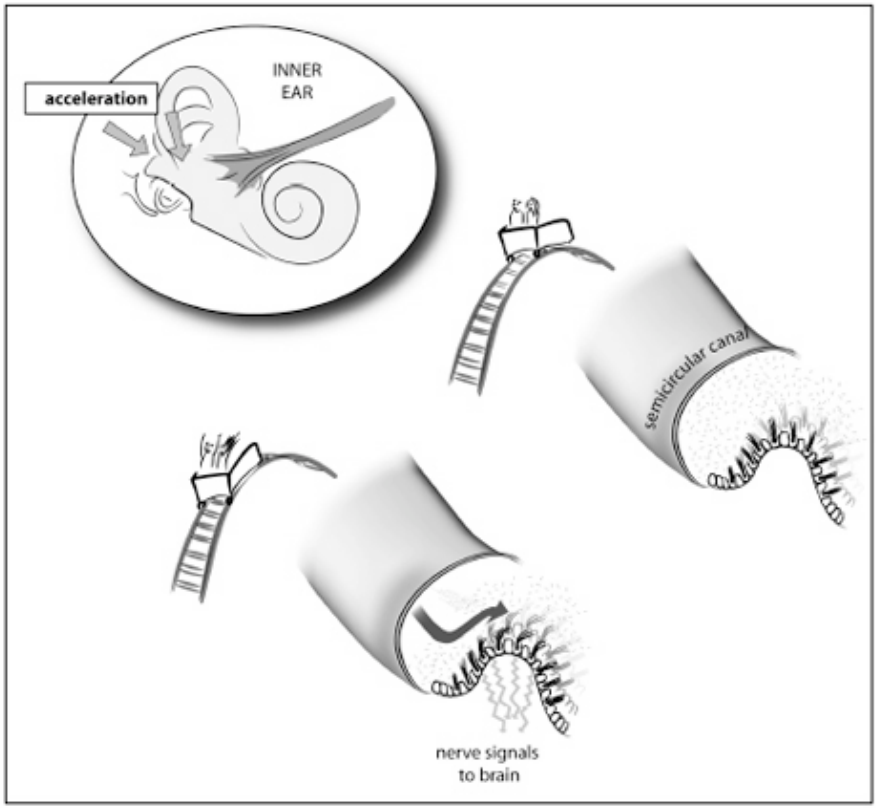
La forma en que percibimos la aceleración se basa en otra parte de nuestro oído interno, conectada a las dos anteriores. Hay tres tubos llenos de gel en el interior del oído; cada vez que aceleramos o detenemos, el gel dentro de los tubos se mueve, causando que las células nerviosas se doblen y estimulen una corriente.

Todo el sistema que usamos para percibir la posición y la aceleración está conectado a los músculos de nuestros ojos. El movimiento de nuestros ojos está controlado por ocho pequeños músculos unidos a las paredes laterales del globo ocular. Los músculos se contraen para mover el ojo hacia arriba, abajo, izquierda y derecha. Podemos mover nuestros ojos voluntariamente contrayendo estos músculos cada vez que decidimos mirar en una nueva dirección; pero algunas de las propiedades más fascinantes de estos músculos se relacionan con su acción involuntaria. Mueven nuestros ojos todo el tiempo, sin siquiera pensarlo.

Para apreciar la sensibilidad de este vínculo ojo-músculo, mueva su cabeza hacia adelante y hacia atrás mientras mira la página. Mantén tus ojos fijos en un lugar mientras mueves la cabeza.

¿Qué pasó durante este experimento? Tus ojos se mantuvieron fijos en un solo punto mientras tu cabeza se movía. Este movimiento es tan común que lo damos por sentado, pero es increíblemente complejo. Cada uno de los ocho músculos de ambos ojos responde al movimiento de la cabeza. Los sensores de tu cabeza, que describiré en la siguiente sección, registran la dirección y la velocidad del movimiento de tu cabeza.

Estas señales son l evadas al cerebro, que luego envía señales que indican a los músculos de los ojos que disparen. Piensa en eso la próxima vez que fijes tu mirada mientras tu cabeza se mueve. Este sistema puede fallar, y los fallos de disparo tienen mucho que decirnos sobre nuestro bienestar general.



Cada vez que aceleramos, el fluido del oído interno se agita. El silbido se transforma en un impulso nervioso que se envía al cerebro.

Una forma fácil de entender la conexión oído interno-ojo es interferir con ella. Una forma en que los humanos hacen esto es beber demasiado alcohol. Beber demasiado etanol nos lleva a hacer cosas tontas porque nuestras inhibiciones se reducen. Beber *demasiado nos* da vueltas. Y las vueltas a menudo predicen una pésima mañana, resaca, con más vueltas, náuseas y dolor de cabeza.

Cuando bebemos demasiado, estamos poniendo mucho etanol en

nuestro torrente sanguíneo, pero el fluido dentro de nuestros tubos auditivos inicialmente contiene muy poco. Sin embargo, con el paso del tiempo, el alcohol se difunde desde nuestra sangre hacia el gel del oído interno. El alcohol es más ligero que el gel, por lo que el resultado de la difusión es como el resultado de verter alcohol en un vaso de aceite de oliva. Así como el aceite se mueve en el vaso cuando el alcohol entra, el gel dentro de nuestro oído se arremolina. La convección causa estragos entre los intempestivos. Nuestras células capilares son estimuladas y nuestro cerebro piensa que nos estamos moviendo. Pero no nos estamos moviendo; estamos tirados en una esquina o encorvados en un taburete. Nuestro cerebro ha sido engañado.

El problema se extiende a nuestros ojos. Nuestro cerebro cree que estamos girando, y pasa esta información a los músculos de nuestros ojos. Los ojos se mueven en una dirección (normalmente hacia la derecha) cuando intentamos seguir un objeto que se mueve de lado a lado. Si se abren los ojos de alguien que está borracho como una piedra, se puede ver este estereotipo de contracción, l amado nistagmo. La policía lo sabe bien, y a menudo busca nistagmo en personas a las que han detenido por conducir de forma errática.

Las resacas masivas implican una respuesta ligeramente diferente. El día después de la borrachera, el hígado ha hecho un trabajo notablemente eficiente para eliminar el

alcohol del torrente sanguíneo. Demasiado eficiente, ya que todavía tenemos alcohol en los tubos de nuestros oídos. Ese alcohol se difunde entonces desde el gel de nuevo en el torrente sanguíneo, y al hacerlo una vez más pone el gel en movimiento: el giro de nuevo. Tome el mismo bebedor empedernido cuyos ojos vio moverse a la derecha la noche anterior y mírelo durante la resaca. Sus ojos podrían seguir moviéndose, pero en la dirección opuesta.

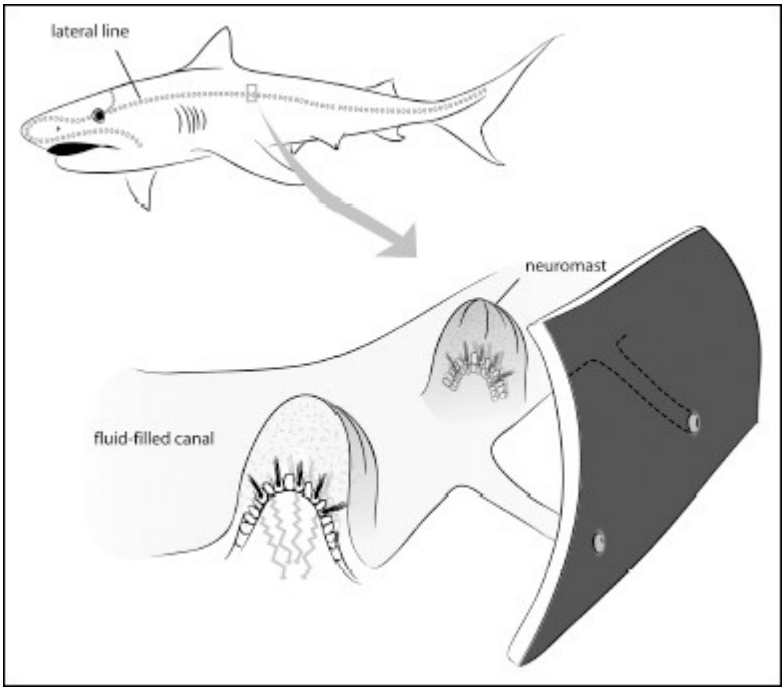
Podemos agradecer nuestra historia compartida con los tiburones y los peces por esto. Si alguna vez has intentado pescar una trucha, entonces te has topado con un órgano que es probablemente un antecedente de nuestro oído interno. Como todo pescador sabe, las truchas se mantienen sólo en ciertas partes de un arroyo, típicamente en lugares donde pueden obtener la mejor comida mientras evitan los depredadores. A menudo estos lugares están a la sombra y en los remolinos de la corriente del arroyo. Los grandes lugares para que los

peces grandes se mantengan detrás de grandes rocas o troncos caídos. Las truchas, como todos los peces, tienen un mecanismo que les permite sentir la corriente y el movimiento del agua a su alrededor, casi como un sentido del tacto.

Dentro de la piel y las espinas del pez, dispuestas en líneas que recorren la longitud del cuerpo y la cabeza, hay pequeños órganos con receptores sensoriales. Estos receptores se encuentran en pequeños paquetes desde los cuales envían pequeñas proyecciones similares a pelos a un saco lleno de gelatina l amado órgano neuromasto.

Ayuda pensar en la bola de nieve de la Estatua de la Libertad de nuevo. Un órgano neuromasto es como uno diminuto, con nervios que se proyectan en su interior. Cuando el agua fluye alrededor de los peces, deforma este pequeño saco, doblando así las proyecciones del nervio, que parecen pelos. Al igual que todo el sistema de nuestros oídos, este aparato envía una señal al cerebro y da a los peces una idea de lo que el agua está haciendo a su alrededor. Los tiburones y los peces pueden discernir la dirección en la que el agua fluye, y algunos tiburones pueden incluso detectar distorsiones del agua, como las producidas por otros peces que nadan cerca de ellos. Usamos una versión de este sistema cuando movimos nuestra cabeza con una mirada fija, y vimos que se estropeaba cuando abrimos los ojos del individuo ebrio al comienzo de esta sección. Si el ancestro que tenemos en común con los tiburones y los peces hubiera usado algún otro tipo de gel para el oído interno, digamos uno que no se arremolinara cuando se le agrega alcohol, nunca nos arremolinamos cuando estamos borrachos.

Si piensas en nuestros oídos internos y órganos neuromastos como versiones de lo mismo, no estarías muy lejos. Ambos provienen del mismo tipo de tejido durante el desarrollo, y comparten una estructura similar. Pero, ¿qué vino primero: los neuromastos o los oídos internos? Aquí la evidencia se vuelve incompleta. Si miras algunos de los primeros fósiles con cabeza, criaturas de unos 500 millones de años, encontrarás pequeñas fosas en su armadura externa que sugieren que tenían órganos neuromastos. Desafortunadamente, no sabemos mucho sobre los oídos internos de estas criaturas porque la preservación de esa zona de la cabeza es deficiente. Hasta que lleguen más pruebas, nos queda una de dos alternativas: o bien nuestros oídos internos



surgieron de los órganos neuromastos o al revés. Ambos escenarios, en su núcleo, reflejan un principio que hemos visto en funcionamiento en otras partes del cuerpo. Los órganos pueden surgir para una función, sólo para ser reutilizados con el tiempo para cualquier número de nuevos usos.

En nuestros propios oídos, se produjo una expansión del oído interno. La parte de nuestro oído interno dedicada a la audición es, como en otros mamíferos, enorme y enroscada. Las criaturas más primitivas, como los anfibios y reptiles, tienen un oído interno simple y desenrol ado. Claramente, nuestros antepasados mamíferos obtuvieron un nuevo y mejor tipo de audición. Lo mismo ocurre con las estructuras que perciben la aceleración. Tenemos tres canales para registrar la aceleración porque percibimos el espacio en tres dimensiones. El primer pez conocido con estos canales, una especie de pez sin mandíbula como el pez bruja, sólo tiene uno. Luego, en otros peces primitivos, vemos dos. Finalmente, la mayoría de los peces modernos, y otros vertebrados, tienen tres, como nosotros.

Hemos visto que nuestro oído interno tiene una historia que puede ser rastreada hasta los primeros peces. Sorprendentemente, las neuronas dentro del gel de nuestros oídos tienen una historia aún más antigua.

Estas neuronas, llamadas células ciliadas, tienen características especiales que no se ven en ninguna otra neurona. Con proyecciones finas parecidas a un pelo, que consisten en un "pelo" largo y una serie de otros más pequeños, estas neuronas se encuentran con una orientación fija en nuestro oído interno y en el órgano neuromasto de un pez.

Recientemente, la gente ha buscado estas células en otras criaturas, y las ha encontrado no sólo en animales que no tienen órganos sensoriales como los nuestros, sino también en animales que no tienen cabeza. Se ven en criaturas como *Amphioxus,* que conocimos en el capítulo 5, que no tienen ni orejas, ni ojos, ni cabeza, ni cráneo. Las células capilares, entonces, estaban haciendo otras cosas antes de que nuestros órganos sensoriales llegaran a la escena.

Una versión primitiva de parte de nuestro oído interno está incrustada en la piel de los peces. Pequeños sacos, los neuromastos, están distribuidos por todo el

---

cuerpo. Cuando se doblan, le dan a los peces información sobre cómo cambia el flujo del agua.

Todo esto está registrado en nuestros genes, por supuesto. Si los humanos o los ratones tienen una mutación que elimina un gen llamado *Pax 2,* el oído interno no se forma correctamente. *Pax 2* está activo en la región del oído y parece iniciar una reacción en cadena de la actividad del gen que lleva al desarrollo del oído interno. Si buscamos este gen en los animales más primitivos, encontramos la Pax *2 activa* en la cabeza y, he aquí, en los neuromastos. El borracho giratorio y los órganos sensoriales del agua del pez tienen genes comunes: evidencia de una historia común.

MEDUSAS Y LOS ORÍGENES DE LOS OJOS Y LOS OÍDOS

Al igual que *la Pax 6, de la* que hablamos antes en relación con los ojos, la *Pax 2* en los oídos es un gen importante, esencial para el desarrol o adecuado. Curiosamente, un vínculo entre *Pax 2* y *Pax 6* sugiere que los oídos y los ojos podrían haber tenido una historia

común muy antigua.

Aquí es donde la medusa de caja entra en nuestra historia. Bien conocidas por los nadadores en Australia porque tienen un veneno particularmente venenoso, estas medusas se diferencian de la mayoría de las otras en que tienen ojos, más de veinte de ellos. La mayoría de estos ojos son simples fosas que se extienden sobre la epidermis de la medusa. Otros ojos del cuerpo son sorprendentemente similares al nuestro, con una especie de córnea, una lente, incluso una estructura nerviosa como la nuestra.

Las medusas no tienen ni *Pax 6* ni *Pax 2: surgieron* antes de que esos genes llegaran a la escena. Pero en la caja de los genes de las medusas vemos algo notable. El gen que forma los ojos no es *Pax 6,* como esperábamos, sino una especie de mosaico que tiene la estructura *tanto de Pax 6* como de Pax 2 . En otras palabras, este gen parece una versión primitiva de Pax *6* y Pax *2 de* otros animales.

Los principales genes que controlan nuestro ojo y oído corresponden a un solo gen en criaturas más primitivas, como las medusas. Probablemente estés pensando, ¿y qué?

La antigua conexión entre los genes del oído y el ojo ayuda a dar sentido a las cosas que vemos en las clínicas de los hospitales hoy en día: un número de defectos de nacimiento humanos afectan *tanto a* los ojos como al oído interno. Todo esto es un reflejo de nuestras profundas conexiones con criaturas primitivas como la medusa caja de picaduras.

CAPÍTULO ONCE

EL SIGNIFICADO DE TODO ESTO

EL ZOO EN TI

Mi introducción profesional al mundo académico ocurrió a principios

de los años 80, durante mis años de universidad, cuando fui voluntario en el Museo Americano de Historia Natural en la ciudad de Nueva York. Aparte de la emoción de trabajar entre bastidores en las colecciones del museo, una de las experiencias más memorables fue asistir a sus ruidosos seminarios semanales. Cada semana un orador venía a presentar algún estudio esotérico sobre historia natural. Después de la presentación, a menudo un asunto bastante discreto, los oyentes escogían la charla punto por punto. Era despiadado. En ocasiones, todo parecía una barbacoa humana, con el orador invitado como el plato principal asado a la brasa. A menudo, estos debates se convertían en sesiones de gritos con toda la alta pantomima operística de una vieja película muda, con puños agitados y pies pisoteados.

Aquí estaba, en los sagrados salones de la academia, escuchando seminarios sobre taxonomía. Ya sabes, taxonomía, la ciencia de nombrar especies y organizarlas en el esquema de clasificación que todos memorizamos en la biología introductoria. No podría imaginar un tema menos relevante para la vida cotidiana, y mucho menos uno menos probable que lleve a eminentes científicos de alto nivel a la apoplejía y a la pérdida de gran parte de su dignidad humana. El mandato "Consíguete una vida" no podría haber parecido más adecuado.

La ironía es que ahora veo por qué se pusieron tan nerviosos. No lo aprecié en ese momento, pero estaban debatiendo uno de los conceptos más importantes de toda la biología. Puede que no parezca muy importante, pero este concepto está en la raíz de la forma en que comparamos diferentes criaturas, un humano con un pez, o un pez con un gusano, o cualquier cosa con cualquier otra cosa. Nos ha llevado a desarrollar técnicas que nos permiten rastrear nuestros linajes familiares, identificar a los criminales mediante pruebas de ADN, comprender cómo el virus del SIDA se volvió peligroso, e incluso rastrear la propagación de los virus de la gripe en todo el mundo. El concepto que estoy a punto de discutir proporciona el fundamento de gran parte de la lógica de este libro. Una vez que lo comprendemos, vemos el significado de los peces, gusanos y bacterias que están dentro de nosotros.

La articulación de las ideas verdaderamente grandes, de las leyes de la naturaleza, comienza con simples premisas que todos nosotros vemos cada día. Desde los simples comienzos, ideas como estas se extienden para explicar las cosas realmente grandes, como el movimiento de las estrellas o el funcionamiento del tiempo. En ese espíritu, puedo

compartir con ustedes una verdadera ley en la que todos podemos estar de acuerdo. Esta ley es tan profunda que la mayoría de nosotros la damos por sentado. Sin embargo, es el punto de partida de casi todo lo que hacemos en paleontología, biología del desarrollo y genética.

Esta "ley de todo" biológica es que cada ser vivo en el planeta tuvo padres.

Todas las personas que has conocido tienen padres biológicos, al igual que todos los pájaros, salamandras o tiburones que has visto. La tecnología puede cambiar esto, gracias a la clonación o algún método aún por inventar, pero hasta ahora la ley se mantiene. Para ponerlo en una forma más precisa: cada ser vivo surgió de alguna información genética de sus padres. Esta formulación define la paternidad de una manera que llega al mecanismo biológico real de la herencia y nos permite aplicarlo a criaturas como las bacterias que no se reproducen como nosotros.

La extensión de esta ley es donde su poder entra en juego. Aquí está, en toda su belleza: todos nosotros somos descendientes modificados de nuestros padres o de la información genética de nuestros padres. Yo soy descendiente de mi madre y mi padre, pero no soy idéntico a ellos. Mis padres son descendientes modificados de sus padres.

Y así sucesivamente. Este patrón de descendencia con modificación define nuestro linaje familiar. Lo hace tan bien que podemos reconstruir su linaje familiar con sólo tomar muestras de sangre de los individuos.

Imagina que estás de pie en una habitación llena de gente que nunca has visto antes.

Se le da una simple tarea: averiguar cuán estrechamente relacionada está cada persona de la habitación con usted. ¿Cómo sabes quiénes son tus primos lejanos, tus primos superdistantes, tus bisabuelos setenta y cinco veces alejados?

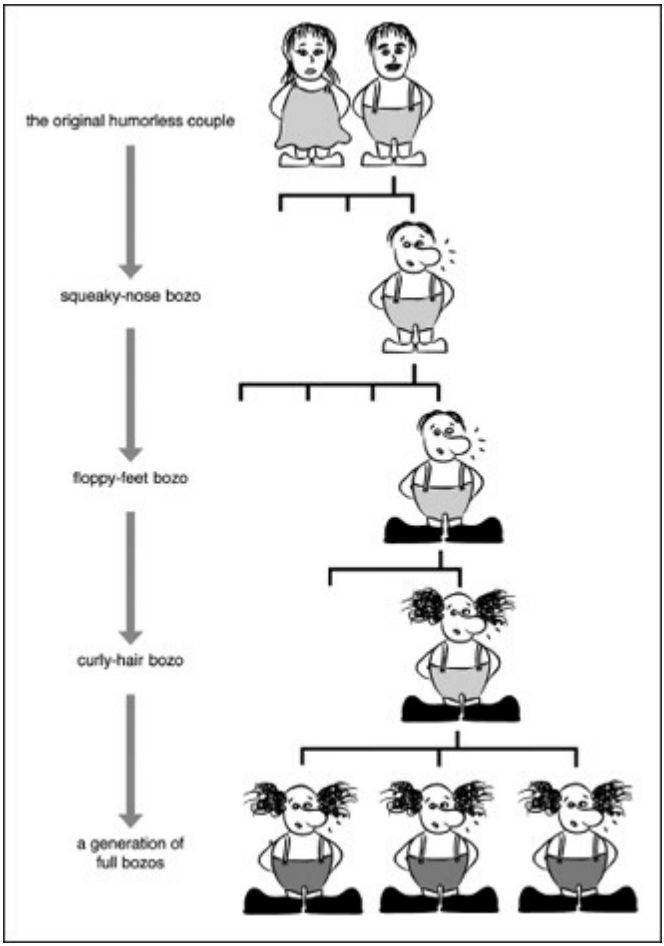
Para responder a esta pregunta, necesitamos un mecanismo biológico que guíe nuestro pensamiento y nos dé una forma de probar la exactitud de nuestro hipotético árbol genealógico. Este mecanismo viene de pensar en nuestra ley de la biología. Saber cómo funciona el

descenso con modificación es clave para desbloquear la historia biológica, porque el descenso con modificación puede dejar una firma, que podemos detectar.

Tomemos una hipotética pareja sin sentido del humor y sin payasos que tiene hijos.

Uno de sus hijos nació con una mutación genética que le dio una nariz de goma roja que chirría. Este hijo crece y se casa con una mujer afortunada. Les pasa el gen de la nariz mutada a sus hijos, y todos tienen su nariz de goma roja que chirría. Ahora, supongamos que uno de sus descendientes tiene una mutación que le causa un enorme pie flácido.

Cuando esta mutación pasa a la siguiente generación, todos sus hijos son como él: tienen una nariz de goma roja que chirría y enormes pies flácidos. Pasa a la siguiente



generación. Imaginen que uno de estos niños, el bisnieto de la pareja original, tiene otra mutación: pelo rizado naranja. Cuando esta mutación pase a la *siguiente* generación, todos sus hijos tendrán el pelo rizado naranja, una nariz de goma que chirría y enormes pies flácidos. Cuando pregunten "¿Quién es este payaso?" estarán preguntando por cada uno de los tataranietos de nuestra pobre pareja.

Este ejemplo ilustra un punto muy serio. La descendencia con la modificación puede construir un árbol genealógico, o linaje, que podemos identificar por los caracteres.

Tiene una firma que reconocemos inmediatamente. Como un conjunto anidado de muñecas rusas, nuestro hipotético linaje formó grupos dentro de grupos, que reconocemos por sus características únicas. El grupo de tataranietos "full bozo"

desciende de un individuo que sólo tenía la nariz chirriante y los enormes pies flácidos.

Este individuo estaba en un grupo de "proto-bozos", que descienden de un individuo que sólo tenía la nariz de goma que chirría. Este "pre-proto-bozo" descendía de la pareja original, que no parecía abiertamente un payaso.

El árbol familiar de los bozo.

Este patrón de descendencia con modificación significa que fácilmente podrías haber formulado una hipótesis sobre el árbol genealógico de los bozo sin que yo te dijera nada al respecto. Si tuvieras una habitación llena de varias generaciones de payasos, habrías visto que todos los parientes payasos están en un grupo que posee una nariz chillona.

Un subconjunto de ellos tiene el pelo naranja y las patas flexibles. Dentro de este subconjunto hay otro grupo, los payasos completos. La clave es que los rasgos -pelo naranja, nariz chirriante, grandes pies flexibles- permiten reconocer los grupos. Estos rasgos son la evidencia de los diferentes grupos, o en este caso generaciones, de payasos.

Reemplaza este circo familiar con rasgos reales -mutaciones genéticas y los cambios corporales que codifican- y tendrás un linaje que puede ser identificado por rasgos

---

biológicos. Si el descenso con modificación funciona de esta manera, entonces nuestros árboles genealógicos tienen una firma en su estructura básica. Esta verdad es tan poderosa que puede ayudarnos a reconstruir los árboles genealógicos sólo a partir de datos genéticos, como vemos por el número de proyectos genealógicos que se están llevando a cabo actualmente. Obviamente, el mundo real es más complejo que nuestro simple ejemplo hipotético. La reconstrucción de los árboles genealógicos puede ser difícil si los rasgos surgen muchas veces diferentes en una familia, si la relación entre un rasgo y los genes que lo causan no es directa, o si los rasgos no tienen una base genética y surgen como resultado de cambios en la dieta u otras condiciones ambientales. La buena noticia es que la pauta de descendencia con modificación puede identificarse a menudo ante

estas complicaciones, casi como si se filtrara el ruido de una señal de radio.

¿Pero dónde se detienen nuestros linajes? ¿Los payasos se detuvieron en la pareja sin humor? ¿Mi linaje se detiene en el primer Shubins? Eso parece muy arbitrario. ¿Se detiene en los judíos ucranianos, o en los italianos del norte? ¿Qué tal en los primeros humanos? ¿O continúa con la escoria de los estanques de 3.800 millones de años, y más allá? Todo el mundo está de acuerdo en que su propio linaje se remonta a algún punto en el tiempo, pero hasta dónde llega el asunto.

Si nuestro linaje se remonta a la escoria de los estanques, y lo hace siguiendo nuestra ley de la biología, entonces deberíamos ser capaces de reunir pruebas y hacer predicciones específicas. En lugar de ser un surtido aleatorio de criaturas, toda la vida en la tierra debería mostrar la misma firma de descendencia con modificación que vimos entre los bozos. De hecho, la estructura de todo el registro geológico tampoco debería ser aleatoria. Las adiciones recientes deberían aparecer en capas de roca relativamente jóvenes. Así como yo soy un recién llegado más reciente que mi abuelo en mi árbol genealógico, la estructura del árbol genealógico de la vida también debería tener sus paralelos en el tiempo.

Para ver cómo los biólogos realmente reconstruyen nuestra relación con otras criaturas, tenemos que dejar el circo y volver al zoológico que visitamos en el primer capítulo del libro.

UN (MÁS LARGO) PASEO POR EL ZOOLÓGICO

Como hemos visto, nuestros cuerpos no se juntan al azar. Aquí, utilizo la palabra

"aleatorio" en un sentido muy específico; quiero decir que la estructura de nuestros cuerpos definitivamente no es aleatoria con respecto a los otros animales que caminan, vuelan, nadan o se arrastran por esta tierra. Algunos animales comparten parte de nuestra estructura; otros no. Hay un orden en lo que compartimos con el resto del

mundo. Tenemos dos orejas, dos ojos, una cabeza, un par de brazos y un par de piernas.

No tenemos siete piernas o dos cabezas. Ni tenemos ruedas.

Un paseo por el zoológico muestra inmediatamente nuestras conexiones con el resto de la vida. De hecho, mostrará que podemos agrupar gran parte de la vida de la misma manera que lo hicimos con los payasos. Vayamos a sólo tres exhibiciones al principio.

Empieza con los osos polares. Puedes hacer una larga lista de las características que compartes con los osos polares: pelo, glándulas mamarias, cuatro miembros, un cuello y dos ojos, entre muchas otras cosas. Luego, considera la tortuga que está al otro lado del camino. Definitivamente hay similitudes, pero la lista es un poco más corta.

Compartes cuatro extremidades, un cuello y dos ojos (entre otras cosas) con la tortuga.

Pero a diferencia de los osos polares y tú, las tortugas no tienen pelo o glándulas mamarias. En cuanto al caparazón de la tortuga, eso parece único para la tortuga, así como el pelo blanco era único para el oso polar. Ahora visiten la exhibición de peces africanos. Sus habitantes siguen siendo similares a ti, pero la lista de cosas en común es aún más corta que la de las tortugas. Como tú, los peces tienen dos ojos. Como tú, tienen cuatro apéndices, pero esos apéndices parecen aletas, no brazos y piernas. Los peces carecen, entre muchas otras características, del pelo y las glándulas mamarias que comparten con los osos polares.

Esto está empezando a sonar como el conjunto de grupos, subgrupos y sub subgrupos de la muñeca rusa que apareció en el ejemplo del bozo. Peces, tortugas, osos polares y humanos comparten algunos rasgos: cabezas, dos ojos, dos orejas, etc. Las tortugas, los osos polares y los humanos tienen todos estos rasgos, y también tienen cuellos y extremidades, rasgos que no se ven en los peces. Los osos polares y los humanos forman un grupo aún más elitista, cuyos miembros tienen todos estos rasgos y también pelo y glándulas mamarias.

El ejemplo del bozo nos da los medios para dar sentido a nuestro paseo por el zoológico. En los bozo, el patrón de los grupos reflejaba el descenso con modificación.

La implicación es que los niños con bozo completo compartían un pariente más reciente que con los niños que sólo tienen una nariz chillona. Eso tiene sentido: el padre de los niños con nariz chirriante

es el tatarabuelo de los payasos. Aplicando este mismo enfoque a los grupos que encontramos durante nuestra caminata por el zoológico significa que los humanos y los osos polares deben compartir un ancestro más reciente que con las tortugas. Esta predicción es cierta: el primer mamífero es mucho más reciente que el primer reptil.

El tema central aquí es descifrar el árbol genealógico de las especies. O, en términos biológicos más precisos, su patrón de relación. Este patrón incluso nos da los medios para interpretar un fósil como *Tiktaalik* a la luz de nuestro paseo por el zoológico.

Tiktaalik es un maravilloso intermediario entre los peces y sus descendientes terrestres, pero las probabilidades de que sea nuestro antepasado exacto son muy remotas. Es más bien un primo de nuestro antepasado. Ningún paleontólogo en su sano juicio afirmaría que él o ella había descubierto "El Antepasado". Piénsalo de esta

manera: ¿Qué posibilidad hay de que al caminar por cualquier cementerio al azar de nuestro planeta descubra un antepasado mío real? Diminutivamente pequeño. Lo que descubriría es que todas las personas enterradas en estos cementerios, sin importar si ese cementerio está en China, Botswana o Italia, están relacionadas conmigo en diferentes grados. Puedo averiguarlo mirando su ADN con muchas de las técnicas forenses que se usan hoy en día en los laboratorios de criminalística. Vería que algunos de los habitantes de los cementerios están relacionados conmigo a distancia, otros están relacionados más estrechamente. Este árbol sería una ventana muy poderosa a mi pasado y a mi historia familiar. También tendría una aplicación práctica porque podría usar este árbol para entender mi predilección por ciertas enfermedades y otros hechos de mi biología. Lo mismo es cierto cuando inferimos relaciones entre especies.

El verdadero poder de este árbol genealógico reside en las predicciones que nos permite hacer. La principal de ellas es que a medida que identifiquemos más características compartidas, deben ser consistentes con el marco. Es decir, a medida que identifique características de las células, el ADN y todas las demás estructuras, tejidos y moléculas en los cuerpos de estos animales, deberían apoyar las agrupaciones que identificamos durante nuestro paseo. Por el contrario, podemos falsificar nuestras agrupaciones encontrando características inconsistentes con ellas. Es decir, si existen muchos rasgos compartidos por los peces y las personas que no se ven en los osos polares, nuestro marco es defectuoso y debe ser revisado o

desechado. En los casos en que las pruebas son ambiguas, aplicamos una serie de instrumentos estadísticos para evaluar la calidad de las características que sustentan los arreglos en el árbol genealógico. En los casos en que hay ambigüedad, el arreglo genealógico se trata como una hipótesis de trabajo hasta que podamos encontrar algo concluyente que nos permita aceptarlo o rechazarlo.

Algunas agrupaciones son tan fuertes que, a todos los efectos, las consideramos un hecho. La agrupación pez-tortuga-oso polar-humano, por ejemplo, está respaldada por características de cientos de genes y prácticamente todos los rasgos de la anatomía, fisiología y biología celular de estos animales. Nuestra estructura pez-humano está tan fuertemente apoyada que ya no tratamos de reunir pruebas para ello, así que sería como tirar una pelota cincuenta veces para probar la teoría de la gravedad. Lo mismo ocurre con nuestro ejemplo biológico. Tendrías la misma oportunidad de ver tu pelota subir la primera vez que la dejas caer que de encontrar una fuerte evidencia contra estas relaciones.

Ahora podemos volver al desafío inicial del libro. ¿Cómo podemos reconstruir con confianza las relaciones entre los animales muertos hace tiempo y los cuerpos y genes de los recientes? Buscamos la firma de la descendencia con la modificación, añadimos características, evaluamos la calidad de la evidencia y evaluamos el grado en que nuestros grupos están representados en el registro fósil. Lo sorprendente es que ahora tenemos herramientas para investigar esta jerarquía, usando computadoras y grandes laboratorios de secuenciación de ADN para realizar los mismos análisis que realizaste durante tu paseo por el zoológico. Ahora tenemos acceso a nuevos sitios de fósiles en

todo el mundo. Podemos ver el lugar de nuestros cuerpos en el mundo natural mejor que nunca.

Desde el capítulo 1 hasta el capítulo 10, hemos demostrado que existen profundas similitudes entre las criaturas que viven hoy en día y aquellos gusanos antiguos, esponjas vivas y varios tipos de peces. Ahora, armados con el conocimiento del patrón de descendencia con modificación, podemos empezar a darle sentido a todo esto.

Suficiente diversión en el circo y el zoológico. Es hora de ir al grano.

Hemos visto que dentro de nuestros cuerpos hay conexiones con una colección de otras criaturas. Algunas partes se parecen a partes de medusas, otras a partes de gusanos, y otras a partes de peces. Estas no son similitudes al azar. Algunas partes de nosotros se ven en todos los demás animales; otras son muy únicas para nosotros. Es profundamente hermoso ver que hay un orden en todas estas características. Cientos de caracteres del ADN, innumerables rasgos anatómicos y de desarrollo, todos siguen la misma lógica que los bozos que vimos antes.

Consideremos algunas de las características de las que ya hemos hablado en el libro y les mostraremos cómo se ordenan.

Con todos los demás animales del planeta, compartimos un cuerpo compuesto de *muchas células.* Llama a este grupo vida multicelular. Compartimos el rasgo de la multicelularidad con todo, desde esponjas a placozoos, medusas y chimpancés.

Un subconjunto de estos animales multicelulares tienen *un plano corporal como el nuestro,* con una parte delantera y una trasera, una parte superior y una inferior, y una izquierda y una derecha. Los taxonomistas l aman a este grupo Bilateria (que significa

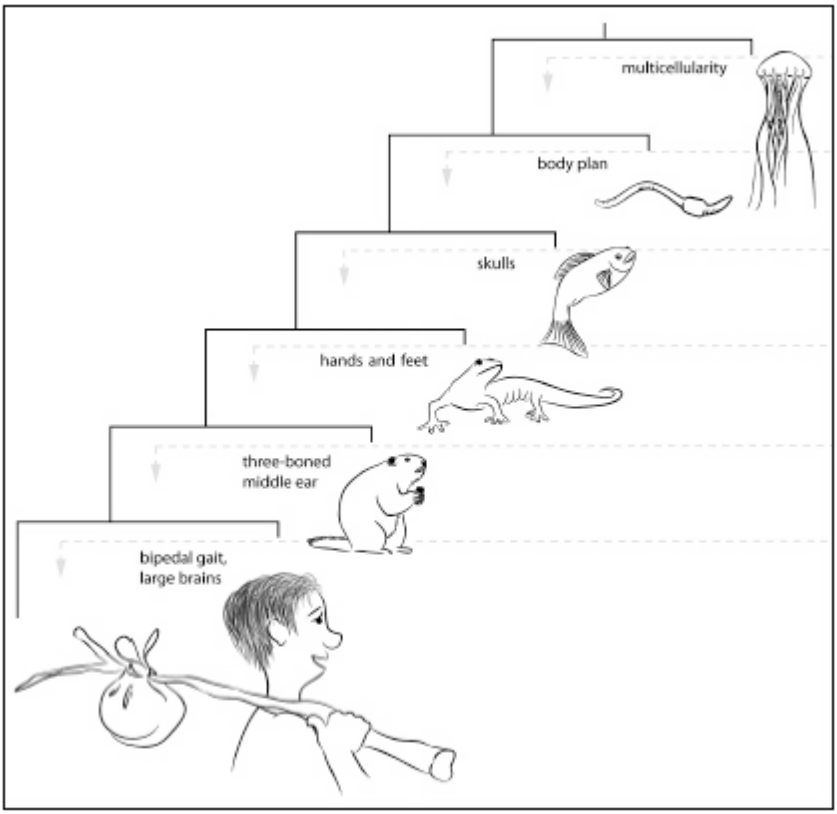
"animales bilateralmente simétricos"). Incluye a todos los animales, desde los insectos hasta los humanos.

Un subconjunto de animales multicelulares que tienen un plan corporal como el nuestro, con un frente y una espalda, una parte superior y una inferior, y una izquierda y una derecha, también tienen cráneos *y espinas dorsales.* Llama a estas criaturas vertebrados.

Un subconjunto de los animales multicelulares que tienen un plan de cuerpo como el nuestro, con un frente y una espalda, una parte superior y una inferior, y una izquierda y una derecha, y que tienen cráneos, también tienen manos *y pies.* Llama a estos vertebrados tetrápodos (animales con cuatro extremidades).

Un subconjunto de los animales multicelulares que tienen un plan de cuerpo como el nuestro, con un frente y una espalda, una parte superior y una inferior, y una izquierda y una derecha, que tienen

cráneos, y que tienen manos y pies, también tienen un oído *medio de tres huesos.* Llama a estos mamíferos tetrápodos.



Un subconjunto de los animales multicelulares que tienen un plano corporal como el nuestro con un frente y una espalda, una parte superior y una inferior, y una izquierda y una derecha, que tienen cráneos y espinas dorsales, que tienen manos y pies, y que tienen una oreja media de tres huesos, también tienen *un andar bípedo y cerebros enormes.* Llama a estos mamíferos personas.

Un árbol genealógico humano, que se remonta a las medusas. Tiene la misma estructura que la de los payasos.

El poder de estas agrupaciones se ve en las pruebas en las que se basan. Cientos de características genéticas, embriológicas y anatómicas las respaldan. Esta disposición nos permite mirar dentro de nosotros mismos de una manera importante.

Este ejercicio es casi como pelar una cebol a, exponiendo capa tras capa de la historia.

Primero vemos características que compartimos con todos los demás mamíferos.

Luego, a medida que profundizamos, encontramos los rasgos que compartimos con los peces. Más profundos aún son los que compartimos con los gusanos. Y así sucesivamente. Recordando la lógica de los bozos, esto significa que vemos un patrón de descenso con modificaciones profundamente grabado dentro de nuestros propios cuerpos. Ese patrón se refleja en el registro geológico. El fósil multicelular más antiguo tiene más de 600 millones de años. El fósil más antiguo con un oído medio de tres huesos tiene menos de 200 millones de años. El fósil más antiguo con una marcha bípeda tiene alrededor de 4 millones de años. ¿Son todos estos hechos sólo coincidencia, o reflejan una ley de la biología que podemos ver trabajando a nuestro alrededor todos los días?

Carl Sagan dijo una vez que mirar las estrellas es como mirar hacia atrás en el tiempo.

La luz de las estrellas comenzó el viaje a nuestros ojos hace eones, mucho antes de que se formara nuestro mundo. Me gusta pensar que mirar a los humanos es como mirar las estrellas. Si sabes cómo mirar, nuestro cuerpo se convierte en una cápsula del tiempo que, cuando se abre, habla de momentos críticos en la historia de nuestro planeta y de

---

un pasado distante en antiguos océanos, arroyos y bosques. Los cambios en la antigua atmósfera se reflejan en las moléculas que permiten a nuestras células cooperar para formar cuerpos. El entorno de los antiguos arroyos dio forma a la anatomía básica de nuestros miembros. Nuestra visión del color y el sentido del olfato han sido moldeados por la vida en los antiguos bosques y llanuras. Y la lista continúa. Esta historia es nuestra herencia, una que afecta nuestras vidas hoy y lo hará en el futuro.

POR QUÉ LA HISTORIA NOS ENFERMA

Mi rodilla estaba hinchada como un pomelo, y uno de mis colegas del departamento de cirugía la estaba torciendo y doblando para determinar si me había torcido o desgarrado uno de los ligamentos o almohadillas de cartílago en el interior. Esto, y la resonancia magnética que siguió, reveló un menisco desgarrado, el resultado probable de veinticinco años de llevar una mochila sobre rocas, cantos rodados y pedregales en el campo. Si se lesiona la rodilla, es casi seguro que se lesionará una o más de tres estructuras: el menisco medial, el ligamento colateral medial o el ligamento cruzado anterior. Tan regulares son las lesiones en estas tres partes de tu rodilla que estas tres estructuras son conocidas entre los doctores como la "Triada Infeliz". Son una clara evidencia de las dificultades de tener un pez interior. Los peces no caminan en dos piernas.

Nuestra humanidad tiene un costo. Por la excepcional combinación de cosas que hacemos -hablar, pensar, agarrar y caminar en dos piernas- pagamos un precio. Este es un resultado inevitable del árbol de la vida dentro de nosotros.

Imagina que intentas hacer girar un Volkswagen Escarabajo para viajar a velocidades de 150 millas por hora. En 1933, Adolf Hitler encargó al Dr. Ferdinand Porsche que desarrollara un coche barato que pudiera alcanzar los 65 km por galón de gasolina y que fuera un medio de transporte fiable para la familia alemana media. El resultado fue el Escarabajo VW. Esta historia, el plan de Hitler, limita las formas en que podemos modificar el Escarabajo hoy en día; la ingeniería puede ser ajustada sólo hasta cierto punto antes de que surjan problemas importantes y el coche l egue a su límite.

En muchos sentidos, los humanos somos el equivalente en pescado de un escarabajo de barra caliente. Toma el plano del cuerpo de un pez, lo viste como un mamífero, luego lo pel izca y lo retuerce hasta que camina en dos piernas, habla, piensa y tiene un control superfino de sus dedos, y tienes una receta para los problemas. Podemos vestir a un pez sólo hasta cierto punto sin pagar un precio. En un mundo perfectamente diseñado, sin historia, no tendríamos que sufrir todo, desde hemorroides hasta cáncer.

En ningún lugar es más visible esta historia que en los desvíos, giros y vueltas de nuestras arterias, nervios y venas. Siga algunos nervios y

encontrará que hacen extraños bucles alrededor de otros órganos, aparentemente yendo en una dirección sólo para torcerse y terminar en un lugar inesperado. Los desvíos son productos fascinantes de nuestro pasado que, como veremos, a menudo nos crean problemas, hipo y hernias, por ejemplo. Y esta es sólo una de las formas en que nuestro pasado regresa para atormentarnos.

Nuestra profunda historia transcurrió, en diferentes épocas, en antiguos océanos, pequeños arroyos y sabanas, no en edificios de oficinas, pistas de esquí y de tenis. No fuimos diseñados para vivir más allá de los ochenta años, sentarnos en nuestros quicios durante diez horas al día, y comer los Twinkies de la anfitriona, ni fuimos diseñados para jugar al fútbol. Esta desconexión entre nuestro pasado y nuestro presente humano significa que nuestros cuerpos se desmoronan de ciertas maneras predecibles.

Prácticamente todas las enfermedades que sufrimos tienen algún componente histórico. Los ejemplos que siguen reflejan cómo las diferentes ramas del árbol de la vida dentro de nosotros, desde los antiguos humanos, pasando por los anfibios y los peces, hasta l egar a los microbios, vuelven a molestarnos hoy en día. Cada uno de estos ejemplos muestra que no fuimos diseñados racionalmente, sino que somos productos de una historia enrevesada.

NUESTRO PASADO DE CAZADOR-RECOLECTOR: OBESIDAD, ENFERMEDADES

CARDÍACAS Y HEMORROIDES

Durante nuestra historia como peces fuimos depredadores activos en los antiguos océanos y arroyos. Durante nuestro pasado más reciente como anfibios, reptiles y mamíferos, fuimos criaturas activas que dependían de todo, desde reptiles hasta insectos. Incluso más recientemente, como primates, éramos animales arbóreos activos, alimentándonos de frutas y hojas. Los primeros humanos eran cazadores-recolectores activos y, en última instancia, agricultores. ¿Notaste algún tema aquí? Ese hilo común es la palabra "activo".

La mala noticia es que la mayoría de nosotros pasamos gran parte del día siendo cualquier cosa menos activos. Estoy sentado en mi trasero

en este mismo momento

escribiendo este libro, y varios de ustedes están haciendo lo mismo leyéndolo (excepto los virtuosos entre nosotros que lo están leyendo en el gimnasio). Nuestra historia desde los peces hasta los primeros humanos no nos preparó de ninguna manera para este nuevo régimen. Esta colisión entre el presente y el pasado tiene su firma en muchas de las enfermedades de la vida moderna.

¿Cuáles son las principales causas de muerte en los seres humanos? Cuatro de las diez causas principales -enfermedades cardíacas, diabetes, obesidad y derrame cerebral- tienen algún tipo de base genética y, probablemente, una base histórica. Gran parte de la dificultad se debe casi con toda seguridad a que tenemos un cuerpo construido para un animal activo, pero el estilo de vida de una patata.

En 1962, el antropólogo James Neel abordó esta noción desde la perspectiva de nuestra dieta. Formulando lo que se conoció como la hipótesis del "genotipo ahorrativo", Neel sugirió que nuestros antepasados humanos estaban adaptados para una existencia de "boom-bust". Como cazadores-recolectores, los primeros humanos habrían experimentado períodos de abundancia, cuando la presa era común y la caza exitosa. Estos períodos de abundancia estarían puntuados por épocas de escasez, cuando nuestros antepasados tenían considerablemente menos que comer.

Neel hipotetizó que este ciclo de fiesta y hambruna tenía una firma en nuestros genes y en nuestras enfermedades. Esencialmente, propuso que los cuerpos de nuestros antepasados les permitían ahorrar recursos en épocas de abundancia para usarlos en períodos de hambruna. En este contexto, el almacenamiento de grasa se vuelve muy útil. La energía de los alimentos que comemos se reparte de manera que algunos apoyan nuestras actividades en el presente, y otros se almacenan, por ejemplo en grasa, para ser utilizados más tarde. Este reparto funciona bien en un mundo en auge y en decadencia, pero fracasa miserablemente en un entorno en el que los alimentos ricos están disponibles 24 horas al día, 7 días a la semana. La obesidad y sus enfermedades asociadas, como la diabetes, la hipertensión y las enfermedades cardíacas, se convierten en el estado natural de las cosas. La hipótesis del genotipo ahorrativo también podría explicar por qué nos gustan los alimentos grasos. Son de alto valor en términos de la cantidad de energía que contienen, algo que

habría conferido una clara ventaja en nuestro pasado lejano.

Nuestro estilo de vida sedentario nos afecta de otras maneras, porque nuestro sistema circulatorio apareció originalmente en animales más activos.

Nuestro corazón bombea sangre, que es llevada a nuestros órganos a través de las arterias y devuelta al corazón a través de las venas. Debido a que las arterias están más cerca de la bomba, la presión sanguínea en ellas es mucho más alta que en las venas.

Esto puede ser un problema particular para la sangre que necesita regresar a nuestro corazón desde nuestros pies. La sangre de los pies necesita subir, por así decirlo, por las venas de las piernas hasta el pecho. Si la sangre está bajo presión baja, puede que no suba todo el camino. En consecuencia, tenemos dos características que ayudan a la

---

sangre a subir. La primera son pequeñas válvulas que permiten que la sangre suba pero impiden que baje. La otra característica son los músculos de nuestras piernas. Cuando caminamos los contraemos, y esta contracción sirve para bombear la sangre a las venas de nuestras piernas. Las válvulas unidireccionales y las bombas de los músculos de las piernas permiten que nuestra sangre suba desde los pies hasta el pecho.

Este sistema funciona magníficamente en un animal activo, que usa sus piernas para caminar, correr y saltar. No funciona bien en una criatura más sedentaria. Si las piernas no se usan mucho, los músculos no bombearán la sangre por las venas. Pueden surgir problemas si la sangre se acumula en las venas, ya que esa acumulación puede hacer que las válvulas fallen. Esto es exactamente lo que sucede con las venas varicosas.

Cuando las válvulas fallan, la sangre se acumula en las venas. Las venas se hacen cada vez más grandes, se hinchan y toman caminos tortuosos en nuestras piernas.

No hace falta decir que la disposición de las venas también puede ser un verdadero dolor en el trasero. Los camioneros y otros que permanecen sentados durante largos períodos de tiempo son

particularmente propensos a las hemorroides, otro coste de nuestras vidas sedentarias. Durante las largas horas que pasan sentados, la sangre se acumula en las venas y en los espacios alrededor del recto. Al acumularse la sangre, se forman las hemorroides, un desagradable recordatorio de que no estamos hechos para estar sentados mucho tiempo, especialmente en superficies blandas.

PRIMATE PAST: HABLAR NO ES BARATO

Hablar tiene un precio muy alto: la asfixia y la apnea del sueño están en la lista de problemas con los que tenemos que vivir para poder hablar.

Producimos los sonidos del habla controlando los movimientos de la lengua, la laringe y la parte posterior de la garganta. Todas estas son modificaciones relativamente simples del diseño básico de un mamífero o un reptil. Como vimos en el capítulo 5, la laringe humana está compuesta principalmente de cartílagos de arco branquial, que corresponden a las barras branquiales de un tiburón o un pez. La parte posterior de la garganta, que se extiende desde el último diente molar hasta justo encima de la laringe, tiene paredes flexibles que pueden abrirse y cerrarse. Hacemos los sonidos del habla moviendo la lengua, cambiando la forma de la boca y contrayendo un número de músculos que controlan la rigidez de esta pared.

La apnea del sueño es una compensación potencialmente peligrosa para la capacidad de hablar. Durante el sueño, los músculos de nuestra garganta se relajan. En la mayoría de las personas, esto no presenta un problema, pero en algunas el pasaje puede colapsar de manera que tramos relativamente largos pasan sin respirar. Esto, por supuesto, puede ser muy peligroso, particularmente en personas con problemas de corazón. La

---

flexibilidad de nuestra garganta, tan útil en nuestra capacidad de hablar, nos hace susceptibles a una forma de apnea del sueño que resulta de la obstrucción de las vías respiratorias.

Otra desventaja de este diseño es la asfixia. Nuestra boca conduce

tanto a la tráquea, a través de la cual respiramos, como al esófago, así que usamos el mismo pasaje para tragar, respirar y hablar. Estas tres funciones pueden estar en desacuerdo, por ejemplo cuando un trozo de comida se aloja en la tráquea.

DE LOS PECES Y LOS RENACUAJOS: HICCUPS

Esta molestia tiene sus raíces en la historia que compartimos con los peces y renacuajos.

Si hay algún consuelo para tener hipo, es que nuestra miseria es compartida con muchos otros mamíferos. Los gatos pueden ser estimulados a tener hipo enviando un impulso eléctrico a una pequeña porción de tejido en su tronco cerebral. Se cree que esta área del tronco cerebral es el centro que controla el complicado reflejo que llamamos hipo.

El reflejo de hipo es un estereotipo de contracción que involucra a un número de músculos en nuestra pared corporal, diafragma, cuello y garganta. Un espasmo en uno o dos de los principales nervios que controlan la respiración hace que estos músculos se contraigan. Esto resulta en una inspiración de aire muy aguda. Luego, unos 35

milisegundos más tarde, un colgajo de tejido en la parte posterior de nuestra garganta (la glotis) cierra la parte superior de nuestra vía respiratoria. La rápida inhalación seguida de un breve cierre del tubo produce el "hic".

El problema es que rara vez experimentamos un solo hic. Detén el hipo en los primeros cinco o diez hics, y tendrás una buena oportunidad de terminar el combate por completo. Si se pierde esa ventana, el ataque de hipo puede persistir por un promedio de 60 hics. Inhalar dióxido de carbono (respirando en la clásica bolsa de papel) y estirar la pared del cuerpo (tomando una gran inhalación y sosteniéndola) puede terminar con el hipo temprano en algunos de nosotros. Pero no en todos. Algunos casos de hipo patológico pueden ser extremadamente prolongados. El hipo más prolongado e ininterrumpido en una persona duró de 1922 a 1990.

Nuestra tendencia a desarrol ar hipo es otra influencia de nuestro

pasado. Hay dos cuestiones en las que pensar. La primera es qué causa el espasmo de los nervios que inicia el hipo. El segundo es lo que controla ese hic distintivo, el cierre abrupto de la inhalación y la glotis. El espasmo nervioso es un producto de nuestra historia de peces, mientras que el hic es un resultado de la historia que compartimos con animales como los renacuajos.

Primero, los peces. Nuestro cerebro puede controlar nuestra respiración sin ningún esfuerzo consciente de nuestra parte. La mayor parte del trabajo tiene lugar en el tronco cerebral, en el límite entre el cerebro y la médula espinal. El tronco cerebral envía impulsos nerviosos a nuestros principales músculos respiratorios. La respiración ocurre en un patrón. Los músculos del pecho, el diafragma y la garganta se contraen en un orden bien definido. En consecuencia, esta parte del tronco cerebral se conoce como un "generador de patrones centrales". Esta región puede producir patrones rítmicos de nervios y, por consiguiente, activación muscular. Varios de estos generadores en nuestro cerebro y médula espinal controlan otros comportamientos rítmicos, como tragar y caminar.

El problema es que el tallo cerebral originalmente controlaba la respiración de los peces; ha sido manipulado para que funcione en los mamíferos. Los tiburones y los peces óseos tienen una porción del tronco cerebral que controla el disparo rítmico de los músculos de la garganta y alrededor de las branquias. Los nervios que controlan estas áreas se originan en una porción bien definida del tronco cerebral. Incluso podemos ver esta disposición de los nervios en algunos de los peces más primitivos del registro fósil. Los antiguos ostracodermos, de rocas de más de 400 millones de años de antigüedad, conservan moldes del cerebro y de los nervios craneales. Al igual que en los peces vivos, los nervios que controlan la respiración se extienden desde el tronco cerebral.

Esto funciona bien en los peces, pero es un arreglo pésimo para los mamíferos. En los peces, los nervios que controlan la respiración no tienen que viajar muy lejos del tronco cerebral. Las branquias y la garganta generalmente rodean esta área del cerebro.

Nosotros los mamíferos tenemos un problema diferente. Nuestra respiración está controlada por los músculos de la pared del pecho y por el diafragma, la lámina de músculo que separa el pecho del abdomen. La contracción del diafragma controla la inspiración. Los nervios que controlan el diafragma salen de nuestro cerebro como lo

hacen en los peces, y salen del tronco cerebral, cerca de nuestro cuello. Estos nervios, el vago y el nervio frénico, se extienden desde la base del cráneo y viajan a través de la cavidad torácica para llegar al diafragma y a las partes del pecho que controlan la respiración. Este camino enrevesado crea problemas; un diseño racional tendría los nervios viajando no desde el cuello sino desde más cerca del diafragma.

Desafortunadamente, cualquier cosa que interfiera con uno de estos nervios puede bloquear su función o causar un espasmo.

Si el curso extraño de nuestros nervios es un producto de nuestro pasado sospechoso, el hipo en sí mismo es probablemente el producto de nuestra historia como anfibios. El hipo es único entre nuestros comportamientos respiratorios en que una abrupta ingesta de aire es seguida por un cierre de la glotis. El hipo parece estar controlado por un generador de patrón central en el tronco cerebral: estimulamos esta región con un impulso eléctrico, y estimulamos el hipo. Tiene sentido que el hipo esté controlado por un generador de patrón central, ya que, al igual que en otros comportamientos rítmicos, durante un hic se produce una secuencia de eventos establecida.

Resulta que el generador de patrones responsable del hipo es prácticamente idéntico al de los anfibios. Y no en cualquier anfibio, en los renacuajos, que usan tanto los pulmones como las branquias para respirar. Los renacuajos usan este generador de patrones cuando respiran con branquias. En esa circunstancia, quieren bombear agua en su boca y garganta y a través de las branquias, pero no quieren que el agua entre en sus pulmones. Para evitarlo, cierran la glotis, el colgajo que cierra el tubo de respiración.

Y para cerrar la glotis, los renacuajos tienen un generador de patrones centrales en su tronco cerebral, de modo que a una inspiración le sigue inmediatamente una glotis que se cierra. Pueden respirar con sus branquias gracias a una forma extendida de hipo.

Los paralelismos entre nuestro hipo y la respiración branquial de los renacuajos son tan extensos que muchos han propuesto que los dos fenómenos son uno solo. La respiración branquial de los renacuajos puede ser bloqueada por el dióxido de carbono, al igual que nuestro hipo. También podemos bloquear la respiración branquial estirando la

pared del pecho, al igual que podemos detener el hipo inhalando profundamente y conteniendo la respiración. Tal vez incluso podríamos bloquear la respiración branquial de los renacuajos haciéndoles beber un vaso de agua al revés.

TIBURÓN PASADO: HERNIAS

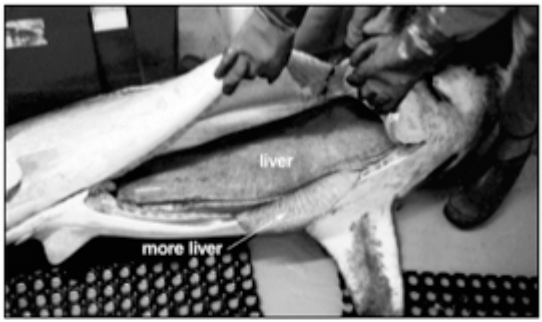
Nuestra propensión a las hernias, al menos a las cercanas a la ingle, es el resultado de tomar un cuerpo de pez y transformarlo en un mamífero.

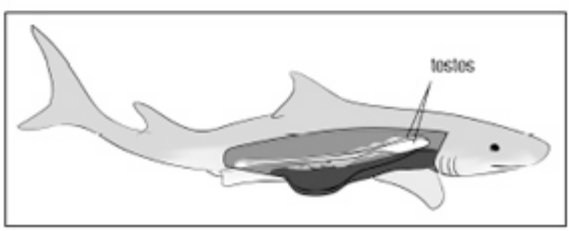
Los peces tienen gónadas que se extienden hacia su pecho, acercándose a su corazón.

Los mamíferos no lo hacen, y ahí radica el problema. Es muy bueno que nuestras gónadas no estén en lo profundo de nuestro pecho y cerca de nuestro corazón (aunque podría hacer que recitar el Juramento de Lealtad sea una experiencia diferente). Si nuestras gónadas estuvieran en nuestro pecho, no podríamos reproducirnos.

Cortar el vientre de un tiburón de la boca a la cola. Lo primero que verás es el hígado, mucho. El hígado de un tiburón es gigantesco. Algunos zoólogos creen que un hígado grande contribuye a la flotabilidad del tiburón. Aleja el hígado y encontrarás las gónadas que se extienden cerca del corazón, en la zona del "pecho". Esta disposición es típica de la mayoría de los peces: las gónadas se encuentran hacia la parte delantera del cuerpo.

En nosotros, como en la mayoría de los mamíferos, este arreglo sería un desastre. Los machos producen continuamente esperma a lo largo de nuestras vidas. Los espermatozoides son pequeñas células quisquillosas que necesitan exactamente el rango correcto de temperaturas para desarrollarse correctamente durante los tres meses que viven. Demasiado caliente, y el esperma se malforma; demasiado frío, y mueren. Los mamíferos machos tienen un pequeño y ordenado dispositivo para





controlar la temperatura del aparato de producción de esperma: el escroto. Como todos sabemos, las gónadas masculinas se encuentran en un saco. Dentro de la piel del saco hay músculos que pueden expandirse y contraerse a medida que la temperatura cambia. Los músculos también se encuentran en nuestros cordones espermáticos. De ahí el efecto de la ducha fría: el escroto se acercará al cuerpo cuando haga frío. Todo el paquete sube y baja con la temperatura. Todo esto es una forma de optimizar la producción de esperma sano.

El escroto colgante también sirve como señal sexual en muchos mamíferos. Entre las ventajas fisiológicas de tener gónadas fuera de la pared del cuerpo, y los beneficios ocasionales que esto proporciona para asegurar la pareja, hay amplias ventajas para nuestros lejanos antepasados mamíferos en tener un escroto.

Abre un tiburón y encontrarás un enorme hígado (arriba). Empuja el hígado a un lado y verás gónadas, que se extienden relativamente cerca del corazón, como en otras criaturas primitivas. Fotos cortesía del Dr. Steven Campana, del Laboratorio Canadiense de Investigación de Tiburones.

El problema con este arreglo es que la tubería que lleva el esperma al pene es tortuosa. El esperma viaja desde los testículos en el escroto a través del cordón espermático. El cordón sale del escroto, sube hacia la cintura, pasa por la pelvis, luego pasa por la pelvis para viajar por el pene y salir. A lo largo de este complejo camino, los espermatozoides obtienen fluidos seminales de varias glándulas que se conectan al tubo.

La razón de esta ruta absurda radica en nuestra historia evolutiva y de desarrollo.

Nuestras gónadas comienzan su desarrollo en el mismo lugar que un tiburón: cerca de nuestros hígados. A medida que crecen y se desarrol an, nuestras gónadas descienden.

En las hembras, los ovarios descienden desde la sección media para estar cerca del

útero y las trompas de Falopio. Esto asegura que el óvulo no tenga que viajar muy lejos para ser fertilizado. En los hombres, el descenso va más lejos.

El descenso de las gónadas, particularmente en los machos, crea un punto débil en la pared del cuerpo. Para imaginar lo que sucede cuando los testículos y el cordón espermático descienden para formar el escroto, imagínese empujando su puño contra una lámina de goma. En este ejemplo, su puño se convierte en equivalente a los testículos y su brazo al cordón espermático. El problema es que has creado un espacio débil donde se sienta tu brazo. Donde antes la lámina de goma era una simple pared, ahora has creado otro espacio, entre tu brazo y la lámina de goma, donde las cosas pueden deslizarse. Esto es esencialmente lo que sucede en muchos tipos de hernias inguinales en los hombres. Algunas de estas hernias inguinales son congénitas, cuando un trozo de intestino viaja con los testículos al descender. Se adquiere otro tipo de hernia inguinal. Cuando contraemos nuestros músculos abdominales, nuestros intestinos empujan contra la pared del cuerpo. Una debilidad en la pared del cuerpo significa que los

intestinos pueden escapar de la cavidad corporal y ser apretados para estar junto al cordón espermático.

Las hembras son mucho más duras que los machos, especialmente en esta parte del cuerpo. Debido a que las hembras no tienen un tubo gigante que lo atraviese, su pared abdominal es mucho más fuerte que la de un hombre. Esto es algo bueno cuando se piensa en el enorme estrés que las paredes del cuerpo de la mujer atraviesan durante el embarazo y el parto. Un tubo a través de la pared del cuerpo no serviría. La tendencia de los hombres a desarrol ar hernias es una compensación entre nuestros ancestros peces y nuestros mamíferos presentes.

El descenso de los testículos. Durante el crecimiento, los testículos descienden desde la posición primitiva de las gónadas en lo alto del cuerpo. Terminan yaciendo en el escroto, que es un bolsillo de la pared del cuerpo. Todo esto deja la pared del cuerpo de los varones humanos débil en la zona de la ingle.

PASADO MICROBIANO: ENFERMEDADES MITOCONDRIALES

Las mitocondrias existen dentro de cada célula de nuestros cuerpos, haciendo un notable número de cosas. Su trabajo más obvio es convertir el oxígeno y los azúcares en un tipo de energía que podemos usar dentro de nuestras células. Otras funciones incluyen metabolizar las toxinas en nuestros hígados y regular diferentes partes de la función de nuestras células. Nos damos cuenta de nuestras mitocondrias sólo cuando las cosas van mal. Desafortunadamente, la lista de enfermedades causadas por el mal funcionamiento de las mitocondrias es extraordinariamente larga y compleja. Si hay un problema en las reacciones químicas en las que se consume el oxígeno, la producción de energía puede verse afectada. El mal funcionamiento puede estar confinado a los tejidos individuales, por ejemplo los ojos, o puede afectar a todos los sistemas del cuerpo. Dependiendo de la ubicación y la gravedad del mal funcionamiento, puede llevar a cualquier cosa, desde la debilidad hasta la muerte.

Muchos de los procesos que usamos para vivir reflejan la historia de

nuestras mitocondrias. La reacción en cadena de eventos químicos que convierte los azúcares y el oxígeno en energía utilizable y el dióxido de carbono surgió hace miles de millones de años, y todavía se ven versiones de ella en diversos microbios. Las mitocondrias llevan este pasado bacteriano en su interior: con una estructura genética completa y una microestructura celular similar a la de las bacterias, es generalmente aceptado que originalmente surgieron de microbios de vida libre hace más de mil millones de años.

De hecho, toda la maquinaria generadora de energía de nuestras mitocondrias surgió en uno de estos tipos de bacterias antiguas.

El pasado bacteriano puede ser usado a nuestro favor para estudiar las enfermedades de las mitocondrias - de hecho, algunos de los mejores modelos experimentales para estas enfermedades *son las bacterias*. Esto es poderoso porque podemos hacer todo tipo de experimentos con bacterias que no son posibles con las células humanas. Uno de los estudios más provocadores fue realizado por un equipo de científicos de Italia y Alemania. La enfermedad que estudiaron invariablemente mata a los bebés que nacen con ella. Llamada cardioencefalomiopatía, es el resultado de un cambio genético que interrumpe la función metabólica normal de las mitocondrias. Al estudiar a un paciente que tenía la enfermedad, el equipo europeo identificó un lugar en el ADN que tenía un cambio sospechoso. Conociendo algo de la historia de la vida, se dirigieron entonces al microbio conocido como *Paracoccus denitrificans,* que a menudo se llama mitocondria de vida libre porque sus genes y vías químicas son muy similares a los de la mitocondria.

Cuán similar fue revelado por el equipo europeo. Produjeron el mismo cambio en los genes de la bacteria que vieron en su paciente humano. Lo que encontraron tiene todo el sentido, una vez que conozcamos nuestra historia. Fueron capaces de simular partes de una enfermedad mitocondrial humana en una bacteria, con prácticamente el mismo cambio en el metabolismo. Esto pone una parte de muchos miles de millones de años de nuestra historia a trabajar para nosotros.

El ejemplo de los microbios no es único. A juzgar por los Premios Nobel otorgados en medicina y fisiología en los últimos trece años, debería haber l amado a este libro *Tu mosca interior, Tu gusano interior* o Tu levadura interior . La investigación pionera sobre las moscas ganó el Premio Nobel de Medicina de 1995 por descubrir un conjunto de genes que construye cuerpos en los humanos y otros animales. Los premios Nobel de medicina en 2002 y 2006 fueron otorgados a personas que hicieron avances significativos en la genética y la salud

humana al estudiar un gusanito de aspecto insignificante (*C. elegans*). Del mismo modo, en 2001, los análisis elegantes de la levadura (incluida la levadura de panadería) y los erizos de mar ganaron el Nobel de medicina por aumentar nuestra comprensión de parte de la biología básica de todas las células. No se trata de descubrimientos esotéricos realizados en criaturas oscuras y sin importancia. Estos descubrimientos sobre la levadura, las moscas, los gusanos y, sí, los peces nos hablan de cómo funciona nuestro propio cuerpo, las causas de muchas de las enfermedades que sufrimos, y las formas en que podemos desarrollar herramientas para hacer nuestras vidas más largas y saludables.

EPÍLOGO

Como padre de dos niños pequeños, me encuentro pasando mucho tiempo últimamente en zoológicos, museos y acuarios. Ser un visitante es una experiencia extraña, porque he estado involucrado con estos lugares durante décadas, trabajando en colecciones de museos e incluso ayudando a preparar exhibiciones en ocasiones. Durante los viajes familiares, me he dado cuenta de lo mucho que mi vocación puede adormecerme ante la belleza y la sublime complejidad de nuestro mundo y nuestros cuerpos. Enseño y escribo sobre millones de años de historia y sobre extraños mundos antiguos, y normalmente mi interés es independiente y analítico. Ahora estoy experimentando la ciencia con mis hijos, en el tipo de lugares donde descubrí mi amor por ella en primer lugar.

Un momento especial ocurrió recientemente con mi hijo en el Museo de Ciencia e Industria de Chicago. Hemos ido allí regularmente durante los últimos tres años por su amor a los trenes y el hecho de que hay una enorme maqueta de ferrocarril en el centro del lugar. He pasado innumerables horas en esa exposición trazando maquetas de locomotoras en su pequeño viaje de Chicago a Seattle. Después de varias visitas semanales a este santuario para los obsesionados por los trenes, Nathaniel y yo caminamos por rincones del museo que no habíamos podido visitar durante nuestras aventuras de observación de trenes o incursiones ocasionales a los tractores y aviones de tamaño completo. En la parte trasera del museo, en el Centro Espacial Henry Crown, los modelos de planetas cuelgan del techo y los trajes espaciales están en vitrinas junto con otros recuerdos del programa espacial de los años 60 y 70. Presumía que en la parte trasera del museo vería las trivialidades que no llegaban a las exposiciones

principales por adelantado. Una de las exhibiciones consistía en una maltrecha cápsula espacial que podías recorrer y mirar en su interior. No parecía significativa; parecía demasiado pequeña y maltrecha para ser algo realmente importante. La pancarta era extrañamente formal, y tuve que leerla varias veces antes de que me diera cuenta: aquí estaba el Módulo de Mando original del Apolo *8,* la nave real que llevó a James Lovell, Frank Borman y William Anders en el primer viaje de la humanidad a la Luna y de vuelta. Esta fue la nave espacial cuyo camino seguí durante las vacaciones de Navidad en el tercer grado, y aquí estaba yo treinta y ocho años más tarde con mi propio hijo, mirando la cosa real. Por supuesto que estaba maltrecho. Pude ver las cicatrices de su viaje y posterior regreso a la tierra. Nathaniel estaba completamente desinteresado, así que lo agarré y traté de explicarle lo que era. Pero no podía hablar; mi voz se ahogó tanto con la emoción que apenas podía pronunciar una sola palabra. Después de unos minutos, recuperé la compostura y le conté la historia del viaje del hombre a la luna.

Pero la historia que no puedo contarle hasta que sea mayor es la razón por la que me quedé sin palabras y emocionado. La verdadera historia es que el Apolo *8* es un símbolo

del poder de la ciencia para explicar y hacer conocible nuestro universo. La gente puede discutir sobre el grado en que el programa espacial era sobre ciencia o política, pero el hecho central permanece tan claro hoy como en 1968: *El Apolo 8* fue un producto del optimismo esencial que alimenta la mejor ciencia. Ejemplifica cómo lo desconocido no debe ser una fuente de sospecha, miedo o refugio a la superstición, sino una motivación para seguir haciendo preguntas y buscando respuestas.

Así como el programa espacial cambió la forma en que miramos a la luna, la paleontología y la genética están cambiando la forma en que nos vemos a nosotros mismos. A medida que aprendemos más, lo que una vez pareció distante e inalcanzable, se vuelve más comprensible y accesible. Vivimos en una era de descubrimientos, cuando la ciencia está revelando el funcionamiento interno de criaturas tan diferentes como medusas, gusanos y ratones. Ahora estamos viendo el destello de una solución a uno de los mayores misterios de la ciencia: las diferencias genéticas que distinguen a los humanos de otras criaturas vivientes. Combinando estos nuevos y poderosos conocimientos con el hecho de que algunos de los descubrimientos más importantes de la paleontología -nuevos fósiles y nuevas herramientas para analizarlos-

han salido a la luz en los últimos veinte años, estamos viendo las verdades de nuestra historia con una precisión cada vez mayor. Mirando hacia atrás a través de miles de millones de años de cambio, todo lo innovador o aparentemente único en la historia de la vida es en realidad sólo cosas viejas que han sido recicladas, recombinadas, reutilizadas o modificadas de otra manera para nuevos usos. Esta es la historia de cada parte de nosotros, desde nuestros órganos sensoriales hasta nuestras cabezas, de hecho, todo nuestro plan corporal.

¿Qué significan los miles de millones de años de historia para nuestras vidas hoy en día? Las respuestas a las preguntas fundamentales a las que nos enfrentamos -sobre el funcionamiento interno de nuestros órganos y nuestro lugar en la naturaleza- vendrán de la comprensión de cómo nuestros cuerpos y mentes han surgido de partes comunes a otras criaturas vivientes. Puedo imaginar pocas cosas más bel as o intelectualmente profundas que encontrar la base de nuestra humanidad, y los remedios para muchos de los males que sufrimos, anidados dentro de algunas de las criaturas más humildes que han vivido en nuestro planeta.

NOTAS, REFERENCIAS Y LECTURAS ADICIONALES

CAPÍTULO UNO ENCONTRAR UN PEZ INTERIOR

He incluido una mezcla de fuentes primarias y secundarias para aquellos interesados en profundizar en los temas del libro. Para los relatos que utilizan las expediciones paleontológicas exploratorias como vehículo para discutir cuestiones importantes de biología y geología, véase *Dinosaurios de los acantilados en llamas,* de Mike Novacek (Nueva York: Anchor, 1997), *Vida en un joven planeta, de* Andrew Knoll (Princeton: Princeton University Press, 2002), y *Nadar en piedra, de* John Long (Melbourne: Freemantle Press, 2006). Todos ellos equilibran el análisis científico con las descripciones de los descubrimientos en el campo.

Los métodos comparativos que discuto, incluyendo los métodos usados en nuestro paseo por el zoológico, son los métodos de la cladística. Una magnífica visión general es la de Henry Gee en *In Search of Deep Time* (New York: Free Press, 1999). Básicamente, presento una versión

de la declaración de los tres impuestos, el punto de partida para las comparaciones cladísticas. Un buen tratamiento con fuentes de fondo se encuentra en Richard Forey y otros, "The Lungfish, the Coelacanth and the Cow Revisited", en H.-

P. Schultze y L. Trueb, eds., *Origin of the Higher Groups of Tetrapods* (Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 1991).

La correlación entre el registro fósil y nuestro "paseo por el zoológico" se discute en varios documentos. Una muestra: Benton, M. J., y Hitchin, R. (1997) Congruencia entre los datos filogenéticos y estratigráficos en la historia de la vida, Actas *de la Real Sociedad de Londres,* B 264:885-890; Norell, M. A., y Novacek, M. J. (1992) Congruencia entre los patrones superpuestos y filogenéticos: Comparando los patrones *cladísticos* con los registros fósiles, *Cladistics* 8:319-337; Wagner, P. J., y Sidor, C. (2000) Age rank/clade rank metrics-sampling, taxonomy, and the meaning of "stratigraphic consistency,"

Systematic Biology 49:463-479.

Las capas de la columna de roca y los fósiles contenidos en ella se discuten hermosa y exhaustivamente en la *Vida* de Richard Fortey *: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (Nueva York: Knopf, 1998). Entre los recursos para la paleontología de vertebrados figuran R. Carroll, *Vertebrate Paleontology and Evolution* (San Francisco: W. H. Freeman, 1987), y M. J. Benton, Vertebrate *Paleontology* (Londres: Blackwell, 2004).

Por el origen de los tetrápodos: Carl Zimmer revisó el estado de la técnica en este campo en su altamente legible y bien investigado *At the Water's Edge* (Nueva York: Free Press, 1998). Jenny Clack ha escrito el texto definitivo sobre toda la transición, *Gaining*

Ground (Bloomington: Indiana University Press, 2002). La biblia de esta transición, el libro de Clack l evará a un novato a la condición de experto rápidamente.

Nuestros documentos originales que describen a *Tiktaalik* aparecieron en el número del 6 de abril de 2006 de *Nature.* Las referencias son: Daeschler y otros (2006) Un pez devoniano parecido al tetrápodo y el origen del plan corporal del tetrápodo, *Nature* 757:757-763; Shubin y

otros (2006) La aleta pectoral de *Tiktaalik roseae* y el origen de la extremidad del tetrápodo, *Nature* 757:764-771. Jenny Clack y Per Ahlberg tenían un comentario muy legible y completo en el mismo número (*Nature 757*:747-749).

Todo sobre nuestro pasado es relativo, incluso la estructura de este libro. Podría haber llamado a este libro "Nuestro humano interior" y haberlo escrito desde el punto de vista de un pez. La estructura de ese libro habría sido extrañamente similar: un enfoque en la historia que los humanos y los peces comparten en cuerpos, cerebros y células. Como hemos visto, toda la vida comparte una parte profunda de su historia con otras especies, mientras que otra parte de su historia es única.

CAPÍTULO DOS CONTROLANDO LA SITUACIÓN

Owen no fue de ninguna manera la primera persona en ver el patrón de un hueso -

dos huesos - blobs - dígitos. Vicq-d'Azyr en el 1600 y Geoffroy St. Hilaire (1812) también hicieron de este patrón parte de su visión del mundo. Lo que distinguió a Owen fue su concepto del arquetipo. Era una organización trascendental del cuerpo, que reflejaba el diseño del Creador. Hilaire buscaba menos un patrón arquetípico oculto en toda estructura que las "leyes de la forma" que gobiernan la formación de los cuerpos. Un buen tratamiento de estos temas está en T. Appel, *El debate Cuvier-Geoffroy: French Biology in the Decades Before Darwin* (Nueva York: Oxford University Press, 1987), y E.

S. Russell, *Form and Function: A Contribution to the History of Morphology* (Chicago: University of Chicago Press, 1982).

Un volumen reciente editado por Brian Hall es una ventanilla única para obtener información sobre la diversidad y el desarrollo de las extremidades y contiene varios documentos importantes sobre diferentes tipos de extremidades: Brian K. Hall, ed., *Fins into Limbs: Evolution, Development, and Transformation* (Chicago: University of Chicago Press, 2007). Entre las referencias útiles para explorar con más detalle el cambio de aletas y extremidades se incluyen Shubin et al. (2006) The pectoral fin of *Tiktaalik roseae and the* origin of the tetrapod limb, *Nature* 757:764-771; Coates, M. I., Jeffery, J.

E., y Ruta, M. (2002) Fins to limbs: what the fossils say, Evolution *and Development* 4:390-412.

CAPÍTULO TRES GENES ÚTILES

La biología del desarrollo de la diversidad de las extremidades ha sido objeto de varios exámenes y documentos primarios. Para una revisión de la literatura clásica véase Shubin, N., y Alberch, P. (1986) A morphogenetic approach to the origin and basic organization of the tetrapod limb, *Evolutionary Biology* 20:319-387; y Hinchliffe, J. R., y Griffiths, P., "The Pre-chondrogenic Patterns in Tetrapod Limb Develoment and Their Phylogenetic Significance", en B. Goodwin, N. Holder, y C. Wylie, eds., *Development and Evolution* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1983), págs. 99-121. Los experimentos de Saunders y Zwilling son ahora clásicos, por lo que algunos de los mejores relatos se ven ahora en los principales libros de texto de biología del desarrollo.

Entre ellos se encuentra S. Gilbert, *Developmental Biology,* 8ª edición. (Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 2006); L. Wolpert, J. Smith, T. Jessell, F. Lawrence, E.

Robertson, y E. Meyerowitz, *Principles of Development* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 2006).

Para el primer artículo que describe el papel de *Sonic hedgehog* en el patrón de las extremidades, véase Riddle, R., Johnson, R. L., Laufer, E., Tabin, C. (1993) *Sonic hedgehog* media la actividad polarizadora de la ZPA, *Cell* 75:1401-1416.

El trabajo de Randy sobre la señalización *sónica* en las aletas de tiburón y raya se encuentra en Dahn, R., Davis, M., Pappano, W., Shubin, N. (2007) *Sonic hedgehog function in* chondrichthyan fins and the evolution of appendage patterning, *Nature* 445:311-314. El trabajo posterior del laboratorio sobre el origen de las extremidades, al menos desde una perspectiva genética, está contenido en Davis, M., Dahn, R., y Shubin, N. (2007) A limb autopodial-like pattern of *Hox* expression in a basal actinopterygian fish, *Nature* 447:473-476.

Las impresionantes similitudes genéticas en el desarrollo de las moscas, los pollos y los humanos se discuten en Shubin, N., Tabin, C., Carrol , S. (1997) Fósiles, genes y la evolución de las extremidades de

los animales, *Nature* 388:639-648; y Erwin, D. y Davidson, E. H. (2003) El último antepasado común bilateriano, *Development* 129:3021-3032.

CAPÍTULO CUATRO DIENTES POR TODAS PARTES

La importancia de los dientes para el conocimiento de los mamíferos es evidente en los muchos tratamientos en el campo. La estructura dental juega un papel particularmente importante en la comprensión de los primeros registros de los mamíferos. Se encuentran extensas reseñas en Z. Kielan-Jaworowska, R. L. Cifelli, y Z.

Luo, *Mammals from the Age of Dinosaurs* (Nueva York: Columbia University Press, 2004); y J. A. Lil egraven, Z. Kielan-Jaworowska, y W. Clemens, eds., *Mesozoic Mammals: The First Two-Thirds of Mammalian History* (Berkeley: University of California Press, 1979), pág. 311.

El mamífero de Farish de Arizona se analiza en Jenkins, F. A., Jr., Crompton, A. W., Downs, W. R. (1983) Mamíferos mesozoicos de Arizona: Nueva evidencia sobre la evolución de los mamíferos, *Science* 222:1233-1235.

Los triteledones que encontramos en Nueva Escocia están descritos en Shubin, N., Crompton, A. W., Sues, H.-D., y Olsen, P. (1991) New fossil evidence on the sister-group of mammals and early Mesozoic faunal distributions, *Science* 251:1063-1065.

Un examen reciente sobre el origen de los dientes, los huesos y los cráneos, en particular la nueva evolución extraída de los animales de conodonte, se encuentra en Donoghue, P. y Sansom I. (2002) Origin and early evolution of vertebrate skeletonization, *Microscopy Research and Technique* 59:352-372. Una revisión exhaustiva de las relaciones evolutivas entre los conodontes y su significado se encuentra en Donoghue, P., Forey, P., y Aldridge, R. (2000) Afinidad de los conodontes y filogenia de los cordados, *Biological Reviews* 75:191-251.

CAPÍTULO CINCO AVANZANDO

En un conjunto de tres volúmenes se encuentra un tratamiento maravillosamente completo y detallado de los detalles de la

estructura, el desarrollo y la evolución del cráneo: *El Cráneo,* James Hanken y Brian Hall, editores. (Chicago: University of Chicago Press, 1993). Se trata de una actualización de varios autores de uno de los volúmenes clásicos sobre el desarrol o y la estructura de la cabeza: G. R. de Beer, *The Development of the Vertebrate Skul* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1937).

Los detalles del desarrollo y la estructura de la cabeza en los humanos se pueden encontrar en los textos sobre anatomía y embriología humana. Para la embriología, ver K. Moore y T.V.N. Persaud, *The Developing Human,* 7ª edición. (Filadelfia: Elsevier, 2006). El texto de anatomía que lo acompaña es K. Moore y A. F. Dalley, *Clinically Oriented Anatomy* (Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006).

El trabajo seminal de Francis Maitland Balfour está encapsulado en Balfour, F. M.

(1874) A preliminary account of the development of the elasmobranch fishes, *Q. J.*

Microsc. Sci. 14:323-364; F. M. Balfour, *A Monograph on the Development of Elasmobranch Fishes,* 4 vols. (Londres: Macmil an & Co., 1878); F. M. Balfour, A Treatise *on Comparative Embryology, 2* vols. (Londres: Macmillan & Co., 1880-81); M. Foster y A.

Sedgwick, The *Works of Francis Maitland Balfour,* con una nota biográfica introductoria de Michael Foster, 4 vols. (Londres: Macmillan & Co., 1885). Un sucesor en Oxford, Edwin Goodrich, produjo uno de los clásicos de la anatomía comparada, *Studies on the Structure and Development of Vertebrates* (Londres: Macmillan, 1930).

Balfour, Oken, Goethe, Huxley y otros abordaban el problema conocido como segmentación de la cabeza. Así como las vértebras difieren en una progresión regular de adelante hacia atrás, la cabeza tiene un patrón segmentado. Una selección de

recursos clásicos y recientes (todos con buena bibliografía) para profundizar en este campo: Olsson, L., Ericsson, R., Cerny, R. (2005) Vertebrate head development: Segmentación, novedades y homología, *Theory in Biosciences* 124:145-163; Jollie, M.

(1977) Segmentación de la cabeza de los vertebrados, *American Zoologist* 17:323-333; Graham, A. (2001) The development and

evolution of the pharyngeal arches, *Journal of Anatomy* 199:133-141.

Una reciente visión general de la base genética de la formación del arco branquial se encuentra en Kuratani, S. (2004) Evolution of the vertebrate jaw: comparative embryology and molecular developmental biology reveal the factors behind evolutionary novelty, *Journal of Anatomy* 205:335-347. Ejemplos de la manipulación experimental de un arco branquial en otro, utilizando tecnologías genéticas, incluyen Baltzinger, M., Ori, M., Pasqualetti, M., Nardi, I., Riji, F. (2005) El derribo de la *Hoxa 2* en el *Xenopus* da lugar a la homeosis hioidomandibular, *Developmental Dynamics* 234:858-867; Depew, M., Lufkin, T., Rubenstein, J. (2002) Specification of jaw subdivisions by *Dlx* genes, *Science* 298:381-385.

En P. Janvier, Early *Vertebrates* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1996) se examina un recurso completo, bien ilustrado e informativo para los primeros registros fósiles de cráneos, cabezas y peces primitivos. El artículo que describe a *Haikouella,* el gusano con branquias de 530 millones de años de antigüedad, es Chen, J.-Y., Huang, D.

Y., y Li, C. W. (1999) An early Cambrian craniate-like chordate, *Nature* 402:518-522.

CAPÍTULO SEIS LOS MEJORES PLANES (DEL CUERPO)

El origen de los planos corporales ha sido objeto de una serie de tratamientos de longitud de libro. Para uno con un alcance y una bibliografía excepcionales, véase J.

Valentine, *On the Origin of Phyla* (Chicago: University of Chicago Press, 2004).

Ha habido varias biografías de von Baer. Una corta es Jane Oppenheimer, "Baer, Karl Ernst von", en C. Gillespie, ed., Dictionary *of Scientific Biography, vol.* 1 (Nueva York: Scribners, 1970). Para tratamientos más detallados, ver *Autobiografía del Dr. Karl Ernst von Baer,* ed., en C. Gillespie. Jane Oppenheimer (1986; publicado originalmente en alemán, 2ª ed., 1886). Véase también B. E. Raikov, Karl Ernst von Baer *, 1792-1876,* traducción del ruso (1968), y Ludwig Stieda, *Karl Ernst von Baer, 2ª edición*. (1886).

Todos estos recursos tienen grandes bibliografías. Véase también S. Gould, *Ontogeny and Phylogeny* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1977), para un análisis de las leyes de von Baer.

Los experimentos de Spemann y Mangold se discuten en los libros de texto de embriología: S. Gilbert, *Developmental Biology,* 8ª ed. (Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, 2006). Una perspectiva genética moderna sobre el Organizador figura en De Robertis, E. M. (2006) Spemann's organizer and self regulation in amphibian embryos, *Nature Reviews* 7:296-302, y De Robertis, E. M., y Arecheaga, J. The

Spemann Organizer: 75 años después, *International Journal of Developmental Biology* 45 (número especial).

Para acceder a la enorme literatura sobre los genes y la evolución de *Hox,* la mejor referencia de partida es el reciente libro de Sean Carrol *Endless Forms Most Beautiful* (New York: Norton, 2004). Una reciente revisión e interpretación de las formas en que los genes nos permiten comprender el ancestro común de los animales bilateralmente simétricos se encuentra en Erwin, D., y Davidson, E. H. (2002) The last common bilaterian ancestor, *Development* 129:3021-3032.

Varios investigadores sostienen que un "giro" genético entre el plan corporal de un antropópodo y el plan corporal de un humano ocurrió en algún momento del pasado lejano. Esta idea se discute en De Robertis, E., y Sasai, Y. (1996) A common plan for dorsoventral patterning in Bilateria, *Nature* 380:37-40. La perspectiva histórica de los puntos de vista de St. Hilaire, así como otras controversias en los primeros años de la anatomía comparativa, se encuentran en T. Appel, *The Cuvier-Geoffroy Debate: French Biology in the Decades Before Darwin* (Nueva York: Oxford University Press, 1987). Los datos de los gusanos de las bellotas no encajan fácilmente en este modelo, y sugieren que en algunos taxones el mapa entre la actividad de los genes y la especificación de los ejes puede haber evolucionado. Para este trabajo, véase Lowe, C. J., y otros (2006) Dorsoventral patterning in hemichordates: insights into early chordate evolution, *PLoS*

Biology online access: http://dx.doi.org/journal.0040291.

La evolución de los genes que determinan los ejes del cuerpo se revisa en Martindale, M. Q. (2005) The evolution of metazoan axial

properties, *Nature Reviews Genetics* 6:917-927. Los genes del plan corporal en los cnidarios (medusas, anémonas de mar y sus parientes) se discuten en una serie de artículos primarios: Martindale, M. Q., Finnerty, J. R., Henry, J. (2002) The Radiata and the evolutionary origins of the bilaterian body plan, Molecular *Phylogenetics and Evolution* 24:358-365; Matus, D. Q., Pang, K., Marlow, H., Dunn, C., Thomsen, G., Martindale, M. (2006) Evidencia molecular de las profundas raíces evolutivas de la bilateralidad en el desarrol o animal, Actas *de la Academia Nacional de Ciencias* 103:11195-11200; Chourrout, D., et al. (2006) Cúmulo de prototipos mínimos inferidos de complementos *Hox* bilaterianos y cnidarios, *Nature* 442:684-687; Martindale, M., Pang, K., Finnerty, J. (2004) Investigando los orígenes de la triploblastia: expresión génica "mesodérmica" en un animal diploblástico, la anémona de mar *Nemostella vectensis* (phylum, Cnidaria; clase, Anthozoa), *Desarrollo* 131:2463-2474; Finnerty, J., Pang, K., Burton, P., Paulson, D., Martindale, M. Q. (2004) Orígenes profundos de la simetría bilateral: Expresión de *Hox* y *Dpp* en una anémona de mar, *Science* 304:1335-1337.

CAPÍTULO SIETE AVENTURAS EN EL CULTURISMO

Tres artículos clave revisan los orígenes y la evolución de los cuerpos y ofrecen una perspectiva integradora de la genética, la geología y la ecología: King, N. (2004) The

unicellular ancestry of animal development, *Developmental Cell* 7:313-325; Knoll, A. H., y Carroll, S. B. (1999) Early animal evolution: Emerging views from comparative biology and geology, *Science* 284:2129-2137; Brooke, N. M., y Holland, P. (2003) The evolution of multicel ularity and early animal genomes, Current Opinion *in Genetics and Development* 13:599-603. Los tres documentos están bien referenciados y ofrecen una buena introducción a los temas del capítulo.

Para tratamientos estimulantes de las consecuencias del origen de los cuerpos y de otras nuevas formas de organización biológica, véase L. W. Buss, *The Evolution of Individuality* (Princeton: Princeton University Press, 2006), y J. Maynard Smith, y E.

Szathmary, *The Major Transitions in Evolution* (Nueva York: Oxford University Press, 1998).

La historia detrás de los animales ediacarios está cubierta, con referencias, en la *Vida* de Richard Fortey *: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (Nueva York: Knopf, 1998), y en Andrew Knoll's *Life on a Young Planet* (Princeton: Princeton University Press, 2002).

El experimento que dio lugar a "protocuerpos" a partir de "no-cuerpos" se describe en Boraas, M. E., Seale, D. B., Boxhorn, J. (1998) Phagotrophy by a flagellate selects for colonial prey: Un posible origen de la multicelularidad, *Evolutionary Ecology* 12:153-164.

CAPÍTULO OCHO HACIENDO AROMAS

La Universidad de Utah tiene un efectivo sitio web, Learn. Genética, que proporciona un maravilloso y simple protocolo de cocina para extraer ADN. La URL es

http://learn.genetics.utah.edu/units/activities/extraction/.

La evolución de los llamados genes de los olores o, más precisamente, los genes de los receptores olfativos tiene una gran literatura. El trabajo seminal de Buck y Axel es Buck, L., y Axel, R. (1991) Una novedosa familia multigénica puede codificar los receptores de olor: una base molecular para el reconocimiento de olores, *Cell* 65:175-181.

Los aspectos comparativos de la evolución de los genes olfativos se tratan en Young, B., y Trask, B. J. (2002) The sense of smell: genomics of vertebrate odorant receptors, *Human Molecular Genetics* 11:1153-1160; Mombaerts, P. (1999) Molecular biology of odorant receptors in vertebrates, *Annual Reviews of Neuroscience* 22:487-509.

Los genes de los receptores olfativos en los peces sin mandíbula se discuten en Freitag, J., Beck, A., Ludwig, G., von Buchholtz, L., Breer, H. (1999) Sobre el origen de la familia de receptores olfativos: genes de los receptores de los peces sin mandíbula (*Lampetra fluviatilis*), *Gene* 226:165-174. La distinción entre genes de receptores

olfativos acuáticos y terrestres se describe en Freitag, J., Ludwig, G., Andreini, I., Rossler, P., Breer, H. (1998) Olfactory receptors in aquatic and terrestrial vertebrates, *Journal of Comparative Physiology A* 183:635-650.

La evolución de los receptores olfativos humanos se discute en varios documentos.

Esta selección refleja los temas tratados en el texto: Gilad, Y., Man, O., Lancet, D. (2003) Human specific loss of olfactory receptor genes, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100:3324-3327; Gilad, Y., Man, O., and Glusman, G. (2005) A comparison of the human and chimpanzee olfactory receptor gene repertoires, *Genome Research* 15:224-230; Menashe, I., Man, O., Lancet, D., Gilad, Y. (2003) Different noses for different people, *Nature Genetics* 34:143-144; Gilad, Y., Wiebe, V., Przeworski, M., Lancet, D., Paabo, S.

(2003) La pérdida de los genes del receptor olfativo coincide con la adquisición de la visión tricromática completa en primates, *PLoS Biology online access:*

http://dx.doi.org/journal.pbio.0020005.

La noción de la duplicación de genes como una importante fuente de nueva variación genética se remonta al trabajo fundamental de Ohno hace casi cuarenta años: S. Ohno, *Evolution by Gene Duplication* (Nueva York: Springer-Verlag, 1970). Una revisión reciente del tema que contiene una discusión tanto de las opsinas como de los genes receptores olfativos se encuentra en Taylor, J., y Raes, J. (2004) Duplication and divergence: the evolution of new genes and old ideas, *Annual Reviews of Genetics* 38:615-643.

CAPÍTULO NUEVE VISIÓN

Los genes de Opsina en la evolución de los ojos han sido descritos en varios trabajos en los últimos años. Entre las revisiones de la biología básica y las consecuencias de la evolución del gen de Opsin se encuentran Nathans, J. (1999) The evolution and physiology of human color vision: insights from molecular genetic studies of visual pigments, *Neuron* 24:299-312; Dominy, N., Svenning, J. C., Li, W. H. (2003) Historical contingency in the evolution of primate color vision, *Journal of Human Evolution* 44:25-45; Tan, Y., Yoder, A., Yamashita, N., Li, W. H. (2005) La evidencia de los genes de opsina rechaza la nocturnaidad en primates ancestrales, Actas *de la Academia Nacional de Ciencias* 102:14712-14716; Yokoyama, S. (1996) Evolución molecular de las opsinas retinianas y no retinianas, *Genes a Células* 1:787-794; Dulai, K., von Dornum, M., Mollon, J., Hunt, D. M. (1999)

La evolución de la visión tricromática del color por la duplicación del gen de la opsina en primates del Nuevo y Viejo Mundo, *Genoma* 9:629-638.

El trabajo de Detlev Arendt y Joachim Wittbrodt sobre los tejidos fotorreceptores se describió originalmente en un artículo de la literatura primaria: Arendt, D., Tessmar-Raible, K., Synman, H., Dorresteijn, A., Wittbrodt, J. (2004) Fotorreceptores ciliares con una opsina de tipo vertebrado en un cerebro invertebrado, *Science* 306:869-871. Un comentario asociado apareció con la pieza: Pennisi, E. (2004) Las proteínas sensibles a la luz del gusano sugieren el origen único del ojo, *Science 306*:796-797. Una revisión

anterior de Arendt proporciona el marco más amplio que utiliza para interpretar el descubrimiento: Arendt, D. (2003) La evolución de los ojos y los tipos de células fotorreceptoras, *International Journal of Developmental Biology* 47:563-571. Se pueden encontrar más comentarios en Plachetzki, D. C., Serb, J. M., Oakley, T. H. (2005) New insights into photoreceptor evolution, *Trends in Ecology and Evolution* 20:465-467. Aún más comentarios sobre el trabajo de Arendt y Wittbrodt por Bernd Fritzsch y Joram Piatigorsky aparecieron en un número posterior de *Science,* con un comienzo -

respuesta que discutió la noción de que el origen de los ojos puede ser extremadamente antiguo, y se remonta a una rama muy profunda de nuestro árbol evolutivo. Este texto puede encontrarse en *Science* (2005) 308:1113-1114.

Una revisión del trabajo de Walter Gehring sobre la *Pax 6* y sus consecuencias para la evolución del ojo está contenida en un relato personal: Gehring, W. (2005) New perspectives on eye development and the evolution of eyes and photoreceptors, *Journal of Heredity* 96:171-184.

Entre los trabajos que examinan las diferentes relaciones posibles entre los genes conservados de formación del ojo y la evolución de los órganos oculares se encuentran Oakley, T. (2003) The eye as a replicating and diverging modular developmental unit, *Trends in Ecology and Evolution* 18:623-627, y Nilsson D.-E. (2004) Eye evolution: a question of genetic promiscuity, Current Opinion *in Neurobiology* 14:407-414.

La relación entre las proteínas del cristalino de nuestros ojos y las de los chorros de mar de las larvas se discute en Shimeld, S., Purkiss, A. G., Dirks, R.P.H., Bateman, O., Slingsby, C., Lubsen, N. (2005) Urochordate byy-crystallin and the evolutionary origin of the vertebrate eye lens, Current *Biology* 15:1684-1689.

CAPÍTULO DIEZ OÍDOS

La genética de la evolución del oído interno se analiza en Beisel, K. W., y Fritzsch, B.

(2004) Keeping sensory cells and evolving neurons to connect them to the brain: molecular conservation and novelties in vertebrate ear development, *Brain Behavior and Evolution* 64:182-197. El desarrollo del oído y los genes que lo sustentan se discuten en Represa, J., Frenz, D. A., Van de Water, T. (2000) Genetic patterning of embryonic ear development, *Acta Otolaryngolica* 120:5-10.

La transformación de la hiomóndula en el estribo se revisa en exhaustivos tratamientos en forma de libro sobre la evolución de los peces primitivos o el origen de los animales terrestres: J. Clack, *Gaining Ground* (Bloomington: Indiana University Press, 2002); P. Janvier, Early *Vertebrates* (Oxford, Eng.: Oxford University Press, 1996).

También se examina en recientes trabajos de investigación, entre ellos Clack, J. A.

(1989) Discovery of the early known tetrapod stapes, *Nature* 342:425-427; Brazeau, M., y Ahlberg, P. (2005) Tetrapod-like middle ear architecture in a Devonian fish, *Nature* 439:318-321.

El origen del oído medio de los mamíferos se discute desde la perspectiva de un historiador científico en P. Bowler, *Life's Spendid Journey* (Chicago: University of Chicago Press, 1996). Las fuentes primarias clave incluyen: Reichert, C. (1837) Sobre los arcos viscerales de los vertebrados en general y sus metamorfosis en aves y mamíferos, *Arch. Anat. Fisiol. Wiss. Med.* 1837:120-222; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkieferes der Wirbeltiere I. Der Processus anterior (Folii) des Hammers der Sauger und das Goniale der Nichtsäuger, *Anatomischer Anzeiger* 39:97-135; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkieferes der Wirbeltiere II. La composición de la mandíbula de los cuadrúpedos, Indicador

Anatómico, 39:433-473; Gaupp, E. (1911) Beiträge zur Kenntnis des Unterkieferieferes der Wirbeltiere III. El problema del origen de una articulación mandibular "secundaria" en los mamíferos, *Anatomical Indicator,* 39:609-666; Gregory, W. K. (1913) Crítica de los trabajos recientes sobre la morfología del cráneo de los vertebrados, especialmente en relación con el origen de los mamíferos, *Journal of Morphology* 24:1-42.

La mayor literatura sobre el origen de la mandíbula de los mamíferos, la masticación y el oído medio de tres huesos incluye a Crompton, A. W. (1963) The evolution of the mammalian jaw, *Evolution* 17:431-439; Crompton, A. W., y Parker, P. (1978) Evolución del aparato masticatorio de los mamíferos, *American Scientist* 66:192-201; Hopson, J.

(1966) El origen del oído medio de los mamíferos, *American Zoologist* 6:437-450; Allin, E. (1975) Evolución del oído de los mamíferos, *Journal of Morphology* 147:403-438.

El origen evolutivo de Pax *2* y *Pax 6* y el vínculo evolutivo de los oídos y los ojos con las medusas de caja se discute en Piatigorsky, J., y Kozmik, Z. (2004) Cubozoan jel yfish: an evo/devo model for eyes and other sensory systems, *International Journal for Developmental Biology* 48:719-729.

Los vínculos de las moléculas receptoras sensoriales con diferentes moléculas en las bacterias se discuten en Kung, C. (2005) A possible unifying principle for mechanosensation, *Nature* 436:647-654.

CAPÍTULO ONCE EL SIGNIFICADO DE TODO ESTO

Los métodos de la sistemática filogenética se examinan en varias fuentes. La literatura primaria clave incluye la obra clásica de Willi Hennig, publicada originalmente en alemán (*Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik*

[Berlín: Deutscher Zentralverlag, 1950]) y traducida al inglés más de una década después (*Phylogenetic Systematics,* trans. D. D. Davis y R. Zangerl [Urbana: University of Illinois Press, 1966]).

Los métodos de reconstrucción filogenética, que constituyen la base

del capítulo, se examinan en detalle en P. Forey, ed., *Cladistics: A Practical Course in Systematics* (Oxford, Eng.: Clarendon Press, 1992); D. Hillis, C. Moritz, y B. Mable, eds., Molecular *Systematics* (Sunderland, Mass.: Sinauer Associates, 1996); R. DeSalle, G. Girbet, y W. Wheeler,

Molecular Systematics *and Evolution: Theory and Practice* (Basilea: BirkhauserVerlag, 2002).

Un tratamiento exhaustivo del fenómeno de la evolución independiente de características similares se encuentra en M. Sanderson y L. Hufford, *Homoplasy: The Recurrence of Similarity in Evolution* (San Diego: Academic Press, 1996).

Para ver el árbol de la vida y las diferentes hipótesis de las relaciones entre los seres vivos, visite http://tolweb.org/tree/.

La noción de que nuestra historia evolutiva tiene implicaciones médicas ha sido objeto de varios buenos libros recientes. Para tratamientos completos y bien referenciados, ver N. Boaz, Evolving *Health: The Origins of Illness and How the Modern World Is Making Us Sick* (New York: Wiley, 2002); D. Mindel , *The Evolving World: Evolution in Everyday Life* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2006); R. M.

Nesse y G. C. Williams, *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine* (Nueva York: Vintage, 1996); W. R. Trevathan, E. O. Smith, y J. J. McKenna, *Evolutionary Medicine* (Nueva York: Oxford University Press, 1999).

El ejemplo de la apnea lo derivé de las conversaciones con Nino Ramírez, presidente del Departamento de Anatomía de la Universidad de Chicago. El ejemplo del hipo se deriva de Straus, C., y otros (2003) A phylogenetic hypothesis for the origin of hiccoughs, *Bioessays* 25:182-188. El conmutador de genes humano-bacteriano utilizado en el estudio de la cardioencefalomiopatía mitocondrial se examinó originalmente en Lucioli, S., et al. (2006) Introducing a novel human mtDNA mutation into the *Paracoccus denitriticans* COX 1 gene explains functional deficits in a patient, *Neurogenetics* 7:51-57.

RECURSOS EN LÍNEA

Varios sitios web y blogs contienen información precisa y se actualizan con frecuencia.

http://www.ucmp.berkeley.edu/ Producido por el Museo de Paleontología de la Universidad de California-Berkeley, es uno de los mejores recursos en línea sobre paleontología y evolución. Se actualiza y revisa continuamente.

http://www.scienceblogs.com/loom/ Este es el blog de Carl Zimmer, una fuente de información y discusión sobre la evolución bien escrita, oportuna y reflexiva.

http://www.scienceblogs.com/pharyngula/ P. Z. Myers, profesor de biología del desarrollo, escribe este blog accesible, informativo y de vanguardia. Es una rica fuente de información que vale la pena seguir.

Tanto el blog de Zimmer como el de Myers están en http://www.scienceblogs.com,

un sitio que contiene una serie de excelentes blogs que también vale la pena seguir para

obtener información y comentarios sobre los descubrimientos recientes. Los blogs relevantes para el tema de este libro en ese sitio incluyen Afarensis, Zoología Tetrápoda, Pensamientos Evolutivos y Expresión Génica.

http://www.tolweb.org/tree/ El Proyecto del Árbol de la Vida ofrece un tratamiento actualizado regularmente y autorizado de las relaciones entre todos los grupos de la vida. Como la página de la UCMP en Berkeley, también incluye recursos para aprender cómo se hacen e interpretan los árboles evolutivos.

RECONOCIMIENTOS

Todas las ilustraciones, salvo las que se indican, son de la Sra. Kalliopi Monoyios

(www.kalliopimonoyios.com). Kapi leyó borradores del manuscrito y no sólo mejoró el texto, sino que diseñó un arte que lo igualaba. He sido verdaderamente afortunado de trabajar con alguien con tantos talentos. Scott Rawlins (Universidad de Arcadia) generosamente dio permiso para usar su elegante representación de *Sauripterus* en el capítulo 2. Ted Daeschler (Academia de Ciencias Naturales de Filadelfia) proporcionó amablemente sus magníficas fotos del gran espécimen *Tiktaalik* "C". Se agradece a Phillip Donoghue (Universidad de Bristol) y Mark Purnell (Universidad de Leicester) por el permiso para usar su representación de la matriz dental de conodonte, a McGraw-Hill por el permiso para usar la figura de libro de texto que inició la caza de *Tiktaalik,* y a Steven Campana del Laboratorio Canadiense de Investigación de Tiburones por las fotos de los órganos de los tiburones.

Una de las mayores deudas de los estudiantes de anatomía es con la gente que dona sus cuerpos para que podamos aprender. Es un raro privilegio aprender de un cuerpo real. Sentado durante largas horas en el laboratorio, uno siente una conexión muy profunda con los donantes que hacen posible la experiencia. Sentí esa conexión de nuevo mientras escribía este libro.

Las ideas que presento aquí se basan en investigaciones que he hecho y en clases que he enseñado. Colegas y estudiantes demasiado numerosos para nombrarlos, estudiantes de medicina y de posgrado, han jugado un papel en el pensamiento que ha entrado en estas páginas.

Tengo una gran deuda con los colegas con los que he trabajado a lo largo de los años.

Ted Daeschler, Farish A. Jenkins, Jr., Fred Mullison, Paul Olsen, William Amaral, Jason Downs, y Chuck Schaff han sido parte de las historias que cuento aquí. Sin estas personas no habría tenido una reserva de experiencia en la que apoyarme, ni me habría divertido tanto en el camino. Los miembros de mi laboratorio en la Universidad de Chicago-Randall Dahn, Marcus Davis, Adam Franssen, Andrew Gillis, Christian Kammerer, Kalliopi Monoyios y Becky Shearman-todos influyeron en mi pensamiento y toleraron mi tiempo fuera del banco mientras escribía.

Entre los colegas que dedicaron su tiempo a proporcionar los

antecedentes o comentarios necesarios sobre el manuscrito se encuentran Kamla Ahluwalia, Sean Carroll, Michael Coates, Randall Dahn, Marcus Davis, Anna DiRienzo, Andrew Gillis, Lance Grande, Elizabeth Grove, Nicholas Hatsopoulos, Robert Ho, Betty Katsaros, Michael LaBarbera, Chris Lowe, Daniel Margoliash, Kalliopi Monoyios, Jonathan Pritchard, Vicky Prince, Cliff Ragsdale, Nino Ramirez, Callum Ross, Avi Stopper, Cliff

Tabin y John Zeller. Haytham Abu-Zayd ayudó con muchos asuntos administrativos. Mis propios profesores de anatomía en el programa de Ciencias de la Salud y Tecnología del MIT de Harvard, Farish A. Jenkins, Jr. y Lee Gehrke, estimularon un interés que ha durado más de veinte años.

El consejo clave en el inicio del proyecto, y la inspiración a lo largo de todo, vino de Sean Carrol y Carl Zimmer.

La Biblioteca Pública de Wellfleet (Wellfleet, Massachusetts) me proporcionó un hogar cómodo y un muy necesario retiro, donde escribí partes significativas del libro.

Un breve período en la Academia Americana en Berlín me puso en un ambiente que resultó crítico cuando estaba completando el manuscrito.

Mis dos jefes, el Dr. James Madara, M.D. (CEO, Centro Médico de la Universidad de Chicago, Vicepresidente de Asuntos Médicos, Decano y Profesor de Servicios Distinguidos Sara y Harold Thompson en la División de Ciencias Biológicas y la Escuela de Medicina Pritzker), y John McCarter, Jr. (CEO, The Field Museum), apoyaron este proyecto y la investigación que lo sustenta. Ha sido un verdadero placer trabajar con líderes tan perspicaces y compasivos.

He tenido la suerte de enseñar en la Universidad de Chicago y de haber tenido la oportunidad de interactuar con la dirección de la Escuela de Medicina Pritzker de allí.

Los decanos, Holly Humphrey y Halina Bruckner, dieron la bienvenida a un paleontólogo a su equipo. A través de la interacción con ellas l egué a apreciar los desafíos y la importancia de la educación médica básica.

Ha sido un gran placer estar asociado con el Museo Field de Chicago, donde he tenido la oportunidad de trabajar con un grupo único de personas dedicadas al descubrimiento, la aplicación y la divulgación científica. Estos colegas incluyen a Elizabeth Babcock, Joseph Brennan, Sheila Cawley, Jim Croft, Lance Grande, Melissa Hilton, Ed Horner, Debra Moskovits, Laura Sadler, Sean VanDerziel y Diane White.

También estoy agradecido por el apoyo, la orientación y el aliento que he recibido de los líderes del Comité de Ciencia de la Junta de Fideicomisarios del Museo del Campo, James L. Alexander y Adele S. Simmons.

Estoy en deuda con mi agente, Katinka Matson, por ayudarme a convertir una idea en una propuesta y por asesorarme durante todo el proceso. Me siento privilegiada de haber trabajado con Marty Asher, mi editor. Como un profesor paciente, me dio una nutrida combinación de consejos, tiempo y ánimo para ayudarme a encontrar mi camino. Zachary Wagman contribuyó a este proyecto de innumerables maneras al ser libre con su tiempo, su agudo ojo editorial y sus buenos consejos. Dan Frank hizo sugerencias perspicaces que me estimularon a pensar en la historia de nuevas maneras.

Jolanta Benal editó el texto y mejoró la presentación enormemente. Estoy muy agradecido a Ellen Feldman, Kristen Bearse y al equipo de producción por su duro trabajo en un calendario tan apretado.

Mis padres, Gloria y Seymour Shubin, siempre supieron que yo escribiría un libro, incluso antes de hacerlo. Sin su fe en mí, dudo que alguna vez hubiera puesto una palabra en el papel.

Mi esposa, Michele Seidl, y nuestros hijos, Nathaniel y Hannah, han estado viviendo con peces, tanto con *Tiktaalik* como con este libro, durante la mayor parte de los dos años. Michele leyó y comentó cada borrador de este texto y apoyó las ausencias de fin de semana largos mientras yo escribía. Su paciencia y amor lo hicieron posible.

Copyright © 2008 por Neil Shubin

Todos los derechos reservados. Publicado en los Estados Unidos por Pantheon Books, una división de Random House, Inc. de Nueva York, y en Canadá por Random House of Canada Limited, Toronto.

Pantheon Books y colofón son marcas registradas de Random House, Inc.

Todas las ilustraciones de Kalliopi Monoyios, a menos que se indique lo contrario.

Datos de catalogación en publicación de la Biblioteca del Congreso
Shubin, Neil.

Tu pez interior: un viaje a los 3.500 millones de años de historia del cuerpo humano /

Por Neil Shubin.

p. cm.

Incluye referencias bibliográficas.

1. Anatomía humana - Obras populares. 2. Evolución humana - Obras populares. I.

Título.

QM26.s58 2008 611-dc22 2007024699

www.pantheonbooks.com

eISBN: 978-0-307-37716-6

v3.0

Document Outline

- CONTENIDO
  - PREFACIO
  - CAPÍTULO UNO
  - CAVANDO FÓSILES, VIÉNDONOS A NOSOTROS MISMOS
  - CAPÍTULO DOS
  - VER LOS PECES
  - ENCONTRAR LOS DEDOS Y LAS MUÑECAS DE LOS PECES
  - CAPÍTULO TRES
  - 2021-03-06-18:52
  - HACER MANOS
  - LA RECETA DE ADN
  - DANDO UNA MANO A LOS TIBURONES
  - CAPÍTULO CUATRO
  - LOS DIENTES Y LOS HUESOS, LAS COSAS DURAS
  - DIENTES, GLÁNDULAS Y PLUMAS
  - CAPÍTULO CINCO
  - EL CAOS INTERIOR DE LA CABEZA
  - LA ESENCIA EN LOS EMBRIONES
  - NUESTRO TIBURÓN INTERIOR
  - GENES DE ARCO BRANQUIAL
  - CABEZAS DE TRACEO: DE LAS MARAVILLAS SIN CABEZA A NUESTROS ANTEPASADOS CON CABEZA
  - CAPÍTULO SEIS
  - EL PLAN COMÚN: COMPARAR LOS EMBRIONES
  - EXPERIMENTANDO CON EMBRIONES
  - DE MOSCAS Y HOMBRES
  - EL ADN Y EL ORGANIZADOR
  - UNA ANÉMONA DE MAR INTERIOR
  - CAPÍTULO SIETE
  - HABEAS CORPUS: MUÉSTRAME EL CUERPO
  - DESENTERRANDO CUERPOS
  - NUESTRO PROPIO CUERPO DE PRUEBAS
  - FISICOCULTURISMO PARA LOS GLÓBULOS ROJOS
  - UNA TORMENTA PERFECTA EN EL ORIGEN DE LOS CUERPOS
  - CAPÍTULO OCHO
  - CAPÍTULO NUEVO
  - MOLÉCULAS QUE RECOGEN LA LUZ
  - TISSUES

- GENES
- CAPÍTULO DIEZ
- EL OÍDO MEDIO, LOS TRES HUESOS DEL OÍDO
- LOS GELES DEL OÍDO INTERNO SE MUEVEN Y LOS PELOS SE DOBLAN
- MEDUSAS Y LOS ORÍGENES DE LOS OJOS Y LOS OÍDOS
- CAPÍTULO ONCE
- UN (MÁS LARGO) PASEO POR EL ZOOLÓGICO
- POR QUÉ LA HISTORIA NOS ENFERMA
- NUESTRO PASADO DE CAZADOR-RECOLECTOR: OBESIDAD, ENFERMEDADES CARDÍACAS Y HEMORROIDES
- PRIMATE PAST: HABLAR NO ES BARATO
- DE LOS PECES Y LOS RENACUAJOS: HICCUPS
- TIBURÓN PASADO: HERNIAS
- PASADO MICROBIANO: ENFERMEDADES MITOCONDRIALES
- EPÍLOGO
- NOTAS, REFERENCIAS Y LECTURAS ADICIONALES
- RECONOCIMIENTOS

- cover.pdf
  - B E S T S E L L E R N A C I O N A L
  - -OLIVER SACKS
  - A UN VIAJE A LOS 3.5 BILLONES DE LA HISTORIA
  - DEL CUERPO HUMANO
- Sem título
- Sem título
- 000
- 111